

先進的低炭素エネルギー技術の開発 途上国展開に関する基礎調査業務 調査報告書

平成 29 年 2 月

(2017 年)

独立行政法人
国際協力機構 (JICA)

有限責任 あずさ監査法人
一般財団法人日本エネルギー経済研究所

産公
JR
17-025

目次

調査概要	1
I. 先進的低炭素エネルギーの見通し（世界）	I-1
1. 世界のエネルギー需給の展望.....	I-1
2. 世界の CO2 排出量の展望.....	I-5
3. 世界におけるエネルギー投資の展望.....	I-8
4. 非 OECD 諸国における電力供給量の展望.....	I-10
5. 非 OECD 諸国におけるエネルギー投資の展望.....	I-13
II. 先進的低炭素エネルギー技術の開発・導入動向	II-1
1. 太陽光発電.....	II-4
2. 地熱発電.....	II-14
3. 陸上風力発電.....	II-25
4. 洋上風力発電.....	II-34
5. 高効率火力発電.....	II-43
6. CCS・CCU.....	II-63
7. 蓄電池（系統用）.....	II-91
8. 水素・燃料電池・アンモニア.....	II-104
9. 次世代照明.....	II-120
10. 需給システム.....	II-128
10.1 スマートコミュニティ.....	II-128
10.2 スマートグリッド.....	II-144
10.3 デマンドレスポンス.....	II-152
10.4 BEMS、HEMS.....	II-160
10.5 系統（超電導送電）.....	II-173
10.6 系統（高圧交流送電及び高圧直流送電、並びに低ロス送電線を含む）.....	II-182
10.7 バーチャルパワープラント.....	II-187
11. その他.....	II-196
11.1 海洋エネルギー.....	II-196
11.2 太陽熱発電.....	II-200
11.3 バイオマス発電.....	II-202
11.4 水力・揚水.....	II-203
III. 先進的低炭素エネルギー技術の市場規模・競合他社分析	III-1
1. 太陽光発電.....	III-2

2. 地熱発電.....	III-22
3. 風力発電.....	III-34
4. 高効率火力発電.....	III-44
5. 蓄電池.....	III-71
IV. 先進的低炭素エネルギー技術に関連する政策・制度.....	IV- 1
1. 先進的エネルギー技術に関連する政策・制度（国内）.....	IV-1
2. 気候変動に関連する資金支援の動向（海外）.....	IV-25
3. カーボンオフセット制度（CDM、JCM）.....	IV-36
4. 緑の気候変動基金（GCF）.....	IV-49
V. 先進的低炭素エネルギー技術の導入可能性の検討（ロードマップ）.....	V- 1
1. 開発途上国への先進的 LCE 技術の導入ロードマップ.....	V-1
2. ロードマップの補足説明.....	V-4
3. 低炭素エネルギー技術毎の補足説明.....	V-21
3.1 太陽光発電.....	V-21
3.2 地熱発電.....	V-33
3.3 風力発電.....	V-40
3.4 高効率火力.....	V-51
3.5 CCS・CCU.....	V-70
3.6 蓄電池（系統用）.....	V-84
3.7 系統（送配電）・エネルギーキャリア.....	V-99
3.8 スマートコミュニティ・スマートグリッド・デマンドレスポンス.....	V-115

(参考資料)

GCF ファンディング・プロポーザル

略語一覧

略語	正式名称	日本語
ABS	Asset Backed Securities	資産担保証券
ADB	Asian Development Bank	アジア開発銀行
AE	Accredited Entity	認証実施機関
AF	Adaptation Fund	適応基金
AHAT	Advanced Humid Air Turbine	高湿分空気利用タービン
A-IGCC	Advanced Integrated Gasification Combined Cycle	先進石炭ガス化複合発電
ANR	Assisted Natural Regeneration	自然の再生補助
AP	Accreditation Panel	認証パネル
A-USC	Advanced Ultra-supercritical	先進超々臨界圧発電
BEMS	Building Energy Management System	ビルエネルギーマネジメントシステム
BNEF	Bloomberg New Energy Finance	ブルームバーグ・ニュー・エネジー・ ファイナンス
BOP	Base of Pyramid	ベース・オブ・ザ・ピラミッド
CAMP4ASB	Climate Adaptation and Mitigation Program for the Aral Sea Basin	アラル海流域における気候変動適応と 緩和プログラム
CBNRM	Community-based Natural Resource Management	地域密着型自然資源管理
CCER	Chinese Certified Emission Reduction	中国認証排出削減量
CCPL	Climate Change Program Loan	気候変動対策プログラム・ローン
CCS	Carbon Capture and Storage	二酸化炭素回収・貯留
CCT	Clean Coal Technology	クリーン・コール・テクノロジー
CCU	Carbon Capture and Utilisation	二酸化炭素回収・利用
CDM	Clean Development Mechanism	クリーン開発メカニズム
CEMS	Community Energy Management System	地域エネルギーマネジメントシステム
CER	Certified Emission Reduction	認証排出削減量
CMP	Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol	京都議定書締約国会合
COP	Conference of the Parties	締約国会議
CPV	Concentrated Photovoltaic	集光型太陽光発電装置
CTF	Clean Technology Fund	クリーン技術基金
D&D	Demonstration & Deployment	実証・配備

略語	正式名称	日本語
DER	Distributed Energy Resource	分散型エネルギーリソース
DERMS	Distributed Energy Resource Management System	分散型エネルギーリソース管理システム
DFIs	Development Finance Institutions	開発金融機関
DR	Demand Response	デマンドレスポンス
EBITDA	Earnings before interest, taxes, depreciation and amortization	利払い・税引き・償却前利益
EC-IFAS	Executive Committee for International Fund for Saving the Aral Sea	アラル海救済国際基金
EE	Executing Entity	執行機関
EGS	Enhanced Geothermal System	涵養地熱発電
EOR	Enhanced oil recovery	増進回収法
EPC	Engineering, Procurement, Construction	設計・調達・建設
ERU	Emission Reduction Units	排出削減ユニット
ESCO	Energy Service Company	エスコ
ESS	Energy Storage System	蓄電池システム
EV	Electric Vehicle	電気自動車
EWS	Early Warning Systems	早期警戒システム
FA	Financial Advisor	ファイナンシャル・アドバイザー
FEMS	Factory Energy Management System	工場エネルギーマネジメントシステム
FIT	Feed-in Tariff	固定価格買取制度
FP	Focal Point	フォーカルポイント
GCCU	Geothermal Combined Cycle Units	地熱複合サイクル発電
GCF	Green Climate Fund	緑の気候基金
GCFB	Green Climate Fund Board	緑の気候基金理事会
GE	Grant Element	グラント・エレメント
GEF	Global Environment Facility	地球環境ファシリティ
GHG	Greenhouse Gas	温室効果ガス
GLOF	Glacial lake Outburst Flood	氷河湖決壊洪水
GTCC	Gas Turbine Combined Cycle	ガスタービン複合発電
GTFC	Gas Turbine Fuel Cell Cycle	ガスタービン燃料電池複合発電
HDR	Hot Dry Rock Geothermal Power Generation	高温岩体発電
HEMS	Home Energy Management System	住宅エネルギーマネジメントシステム
HVAC	High Voltage Alternating Current	高圧交流送電

略語	正式名称	日本語
HVDC	High Voltage Direct Current	高压直流送電
ICT	Information and Communication Technology	情報通信技術
IDA	International Development Association	国際開発協会
IEA	International Energy Agency	国際エネルギー機関
IEEJ	The Institute of Energy Economics, Japan	日本エネルギー経済研究所
IEU	Independent Evaluation Unit	独立評価ユニット
IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle	石炭ガス化複合発電
IGFC	Integrated Gasification Fuel Cell Cycle	石炭ガス化燃料電池複合発電
IU	Independent Integrity Unit	独立十全性ユニット
IMF	International Monetary Fund	国際通貨基金
IoT	Internet of Things	モノのインターネット
IRM	Independent Redress Mechanism	独立是正メカニズム
IRR	Internal Rate of Return	内部収益率（商業的リターン）
ISCC	Integrated Solar Combined Cycle	太陽熱コンバインド発電
JBIC	Japan Bank for International Cooperation	国際協力銀行
JCM	Joint Crediting Mechanism	二国間クレジット制度
JI	Joint Implementation	共同実施
JICA	Japan International Cooperation Agency	独立行政法人国際協力機構
KCER	Korean Certified Emission Reduction	韓国認証排出削減量
LCE	Low Carbon Energy	低炭素エネルギー
LCOE	Levelized Cost of Electricity	均等化発電原価
LDCs	Least Developed Countries	後発開発途上国
LED	Light Emitting Diode	発光ダイオード（照明）
LMIC	Lower Middle Income Countries	中所得国
M&A	Mergers and Acquisitions	合併と買収
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	熔融炭酸塩形燃料電池
MDBs	Multilateral Development Bank	国際開発金融機関
MUMSS	Mitsubishi UFJ Morgan Stanley Securities	三菱UFJモルガン・スタンレー証券
NAPA	National Adaptation Programmes of Action	国別適応行動計画
NDA	National Designated Authorities	国家指定機関
NEDO	New Energy and Industrial Technology Development Organization	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
NEXI	Nippon Export and Investment Insurance	独立行政法人 日本貿易保険

略語	正式名称	日本語
NGO	Non-Governmental Organization	非政府組織
O&M	Operation and Maintenance	オペレーション&メンテナンス
OCR	Ordinary Capital Resources	通常資金財源
ODA	Official Development Assistance	政府開発援助
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development	経済協力開発機構
OEL	Organic Electro Luminescence	有機EL
OTEC	Ocean Thermal Energy Conversion	海洋温度差発電
PAF	Pilot Auction Facility	パイロット・オークション・ファシリティ
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell	リン酸形燃料電池
PCS	Power Conditioning System	パワーコンディショナー
PDC	Polycrystalline Diamond Compact	多結晶人工ダイヤモンド薄層
PDD	Project Design Document	プロジェクト設計書
PEFC	Polymer Electrolyte (Membrane) Fuel Cell	固体高分子形燃料電池
PFI	Participating Financial Institutions	参加金融機関
PPP	Purchasing Power Parity	購買力平価
PMDD	Permanent Magnet Direct Drive	永久磁石直接駆動
PSAG	Private Sector Advisory Group	民間セクターアドバイザーグループ
PSF	Private Sector Facility	民間セクターファシリティ
R&D	Research & Development	研究・開発
REDD+	Reduction of Emission from Deforestation and forest Degradation	途上国における森林減少と森林劣化からの排出削減並びに森林保全、持続可能な森林管理、森林炭素蓄積の増強
PV	Photovoltaic	太陽光発電
RF	Redox Flow	レドックス・フロー
RFP	Request for Proposal	提案依頼書
SC	Supercritical	超臨界圧発電
SDGs	Sustainable Development Goals	持続可能な開発目標
SDM	Sustainable Development Mechanism	持続可能な発展メカニズム
SEFF	Sustainable Energy Financing Facility	持続的エネルギー金融機構
SG	Smart Grid	スマートグリッド
SIDS	Small Island Developing States	小島嶼開発途上国
SMEs	Small and Medium Enterprises	中小企業

略語	正式名称	日本語
SOC	State of Charge	充電状態
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	固体酸化物形燃料電池
STEP	Special Terms for Economic Partnership	本邦技術活用条件（円借款）
TAF	Technical Assistance Facility	技術支援ファシリティ
TOR	Terms of Reference:	委託事項
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change	気候変動に関する国際連合枠組条約
USC	Ultra-supercritical	超々臨界圧発電
VPP	Virtual Power Plant	仮想発電所
ZEH	Zero Energy House	ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス

調査概要

1. 調査の背景

世界全体の温室効果ガスを削減していくには、自国での対策を進めるだけでなく、世界全体で効果的な削減を実現するという観点が必要である。今後、開発途上国においては、人口増加や経済成長を背景にエネルギー需要が増加し、温室効果ガスの排出量の増加を含む、様々なエネルギーに関する開発課題が深刻化すると予想される。

これらエネルギーに関する開発課題を解決する鍵は「革新的技術の開発と普及」にあると考えられ、経済成長と温室効果ガスの排出削減を両立するためには、革新的技術の活用が必要不可欠であり、有用な技術の開発途上国への普及を促進し、持続可能な社会の実現に貢献していくことが、SDGs（持続可能な開発目標）の視点からも求められている。

我が国は、COP21において採択されたパリ協定に基づき、2030年度26%削減（2013年度比）に向けた対策の実施が求められる。ポスト京都議定書の枠組みが今後創設されていく中で、エネルギー・環境分野において豊富な知見・経験を有している我が国としては、低炭素エネルギー（Low Carbon Energy：LCE）技術を積極的に活用して、途上国が抱えるエネルギー・環境分野の開発課題の解決に大いに貢献していくことが求められている。JICAは、これまでも様々な開発スキームにより、これらの分野の課題解決に貢献してきており、近年では科学技術協力（SATREPS）や民間との連携を通じた支援も拡充してきている。このことは、結果として本邦企業が有する優れた技術の海外展開にも繋がっている。

開発途上国への低炭素技術の導入に当たっては、市場のニーズ（コスト、スペック、品質等）に合わせるとともに、相手国が自助努力での運営・維持管理（O&M）が可能となるような方策が必要である。また、ある技術単体での導入のみならず、複数の技術を組み合わせることでより大きな効果を発揮することが可能な技術の普及を図るほうが有用である場合があることや、開発段階から開発途上国における最適な組み合わせを念頭に置いたシステムとしての構築を検討していくことも重要である。

JICAは、エネルギー分野の協力方針として低廉（Low-Cost）、低炭素（Low-Carbon）、低リスク（Low-Risk）の3つの“L”をバランスよく満たすこと及びエネルギー・アクセスを改善して包摂的な成長と貧困削減に貢献することを目的とした支援を実施しているが、我が国の先進的なLCE技術を活用により、こうした取り組みが一層効果的に推進されることが期待されている。

2. 調査の目的

上記を本調査の背景として、以下を目的として調査を実施する。

- 我が国が比較優位性を有しているエネルギー効率、省エネルギー、再生可能エネルギー、系統安定化、水素・燃料電池等の先進的LCE技術の研究開発及び導入普及動向を整理・分析し、市場・競合他社分析を行い、先進的LCE技術を途上国向けに導入普及していくためのロードマップ策定を行う。

3. 調査の手順（本報告書の記載箇所）

- (1) 世界におけるエネルギー予測（特に電力分野）を調査し、先進的 LCE 技術の市場規模等を調査する。
 - (Ⅰ. 先進的低炭素エネルギーの見通し（世界）)
- (2) 先進的 LCE 技術に関する、国内での導入の背景・必要性、国内外の研究開発状況の確認をする。
 - (Ⅱ. 先進的低炭素エネルギー技術の開発・導入動向)
- (3) 太陽光、地熱、風力、高効率火力、蓄電池について市場規模・競合他社分析を実施し、日本の技術の優位性を検討する。
 - (Ⅲ. 先進的低炭素エネルギー技術の市場規模・競合他社分析)
- (4) 先進的 LCE 技術の導入に関連する政策及び資金支援策等について調査し、開発途上国における利用可能性や課題等について検討する。
 - (Ⅳ. 先進的低炭素エネルギー技術に関連する政策・制度)
- (5) 上記をもとに、今後の途上国への先進的 LCE 技術の導入に関するロードマップを策定する。
 - (Ⅴ. 先進的低炭素エネルギー技術の導入可能性の検討（ロードマップ）)

4. 調査の実施体制

本調査は、有限責任あずさ監査法人および一般財団法人日本エネルギー経済研究所が共同事業体を組成し、業務を実施した。また、政策・制度面の一部について、三菱 UFJ モルガン・スタンレー証券株式会社に業務を再委託している。

5. 調査の対象範囲

開発途上国への本邦技術の導入可能性検討に当たっては、本邦企業による海外展開の可能性を広くとらえることとした。そのため、現状においては日本の優位性や競争力があまり見いだせない技術であっても、途上国の低炭素に資するもので、海外市場の拡大が見込まれる等の場合には、先進的 LCE 技術として検討対象に含めている。

また、先進的 LCE 技術の導入可能性は国・地域ごとに条件が異なり、一律には決定できないため、本ロードマップでは国・地域の個別事項については反映していない。（中国については、将来に亘ってもインドと並ぶ温室効果ガスの一大排出国であるが、ODA による支援が極

めて限定されていること、民間による商業ベースでの導入が主であることから、本調査では対象外とした。)

日本の技術の優位性、途上国進出の課題、政策支援については、LCE 技術毎に企業や海外機関等へのインタビューの他、文献調査等により、とりまとめを行った。

なお、本調査においては、原子力は対象範囲に含めないこととした。

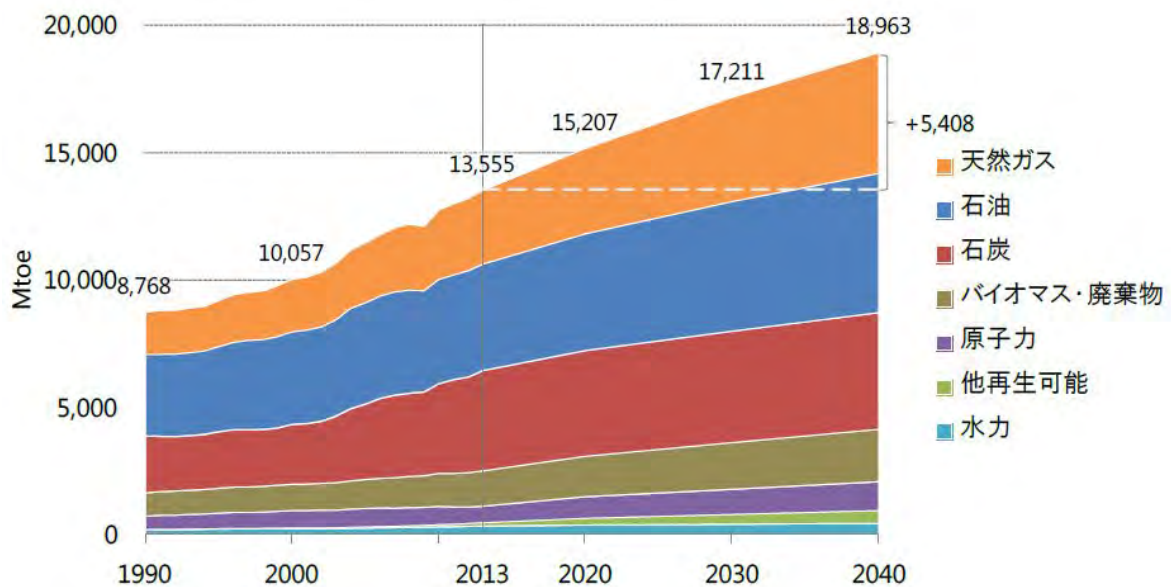
I. 先進的低炭素エネルギーの見通し（世界）

1. 世界のエネルギー需給の展望¹

2040年までの世界における1次エネルギー消費は、特に中国やアジア等の新興国における人口増加と経済成長の影響により、大きく増加することが見込まれている。

日本エネルギー経済研究所(IEEJ)が作成した「アジア／世界エネルギーアウトック 2015」によると、2040年における1次エネルギーの消費量は石油換算18,963百万トン(Mtoe)²と、2013年の13,555Mtoeよりも5,408Mtoe増加し、今後27年間で1.4倍の増加を見込んでい。その内訳をみると、以下のとおり、石油、天然ガス、石炭の消費が大半を占めている。

図1：：第一次エネルギー消費（世界）



出典：アジア／世界エネルギーアウトック 2015 (IEEJ)

また、最終電力消費についても同様に、世界全体において増加が見込まれており、特に中国、インド、ASEANにおける2020年から2040年までの電力消費の増加が大きくなっている。中国においては日本の現消費量(950TWh³)の4.0倍、インドにおいては同2.5倍にも相当する電力需要の増加が見込まれている。

発電構成で見ると、石炭や天然ガスを中心とする火力発電が全体の7割弱を占めると予想されている。シェアとしては、特に欧米において石炭火力が減少することから、石炭火力のシェアが低下する一方、天然ガス火力のシェアは2013年の22%から2040年位28%に増加すると

¹ アジア／世界エネルギーアウトック 2015 日本エネルギー経済研究所 2015年10月

² エネルギー需給にまつわる社会・経済・政策・技術導入等の趨勢的な変化の継続を想定するレファレンスケースにおける予測。

³ テラワットアワー、tera (T) 10¹²

見込まれる。天然ガス火力は、技術開発により天然ガス複合発電（CCGT）が普及し、再生可能エネルギーの変動性への調整電源としてガスタービンも用いられる等により、天然ガスへのシフトが進展するとされている。

一方、再生可能エネルギー発電の構成比は、2040年にて水力（5.0PWh⁴）と他の再生可能エネルギー（3.0PWh）の合計で全体の23%と現在22%からそれほど変わらない。同予測においては、風力発電及び太陽光発電等による発電量は政策支援や技術開発により、2013年の789TWhから2040年には2,778TWhと急速に拡大すると見込んでおり、そのために必要となる設備容量としては、風力が998GW⁵、太陽光749GWが必要でそれぞれ現在の容量の3.1倍と5.5倍とのことである。水力に関しては、大規模開発の鈍化により、シェアとしては低下すると見込んでいる。

図 2：最終電力消費の増加（選定地域）（左）、電源構成（世界）（右）



注：線は2013年の日本の消費量950 TWh

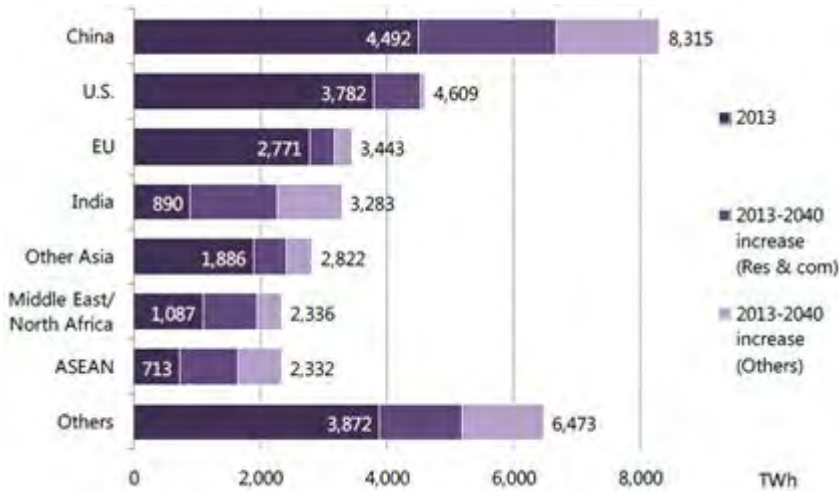
出典：アジア／世界エネルギーアウトック 2015 (IEEJ)

参考までに、レファレンスケースにおける国別の発電消費量を示すと以下のとおりであり、2040年には中国が他国を大きく上回り、インドにおいても米国や EU と同レベルの消費量となっていく。

⁴ ペタワットアワー、*peta (P)* 10¹⁵

⁵ ギガワット、*giga (G)*10⁹

図 3：国別の発電消費量（レファレンスケース）



出典：アジア／世界エネルギーアウトック 2015（IEEJ）

同様に、IEA が公表した World Energy Outlook 2016 の発電電力量見通し（WEO 新政策シナリオ）においても、2040 年の電力供給量は、2014 年の 23,809TWh から 2040 年には 39,047TWh と 2014 年比で 64%（15,238TWh）の増加が見込まれている。構成別には、石炭火力が発電量は増加するがシェアは減少し、一方、天然ガス火力の発電量は 1.7 倍となる。

また、IEA の見通しでは、新政策シナリオの場合、再生可能エネルギーの発電量が約 37%（水力を除くと約 21%）と現状の約 23%（水力を除くと約 6%）よりシェアが拡大するとしている。一方、450 シナリオの場合には、2040 年までに再生可能エネルギーによる発電が 58% になり、風力発電と太陽光発電は、今日の 4% から全体の約 1/3 の 10,500 TWh まで増加し、風力発電は現状の 5.5 倍の 2,300GW 超、太陽光発電は現状の 9 倍の 2,100GW になると予測している。

図 4：2040年の電力供給量（シナリオ別）

			New Policies		Current Policies		450 Scenario	
	2000	2014	2025	2040	2025	2040	2025	2040
Total	15 476	23 809	29 540	39 047	30 886	42 511	27 688	34 092
Fossil fuels	10 017	15 890	17 175	20 243	19 183	26 246	14 113	8 108
Coal	6 005	9 707	9 934	10 787	11 479	15 305	7 062	2 518
Gas	2 753	5 148	6 514	8 910	6 957	10 361	6 466	5 389
Oil	1 259	1 035	727	547	746	580	585	200
Nuclear	2 591	2 535	3 405	4 532	3 319	3 960	3 685	6 101
Hydro	2 619	3 894	4 887	6 230	4 817	5 984	4 994	6 891
Other renewables	250	1 489	4 074	8 041	3 567	6 320	4 896	12 992
Fossil fuels	65%	67%	58%	52%	62%	62%	51%	24%
Coal	39%	41%	34%	28%	37%	36%	26%	7%
Gas	18%	22%	22%	23%	23%	24%	23%	16%
Oil	8%	4%	2%	1%	2%	1%	2%	1%
Nuclear	17%	11%	12%	12%	11%	9%	13%	18%
Hydro	17%	16%	17%	16%	16%	14%	18%	20%
Other renewables	2%	6%	14%	21%	12%	15%	18%	38%

出典：World Energy Outlook 2016 (IEA)

その他の予測としては、U.S. Energy Information Administration が公表している International Energy Outlook 2016 によるものがある。同予測によると、2040年における再生可能エネルギーの発電量は約 10PWh となり、シェアも約 3 割弱と増加が見込まれている。特に、風力発電の増加量が大きい。⁶

Figure 5. World net electricity generation by fuel, 2012–40 (trillion kilowatthours)

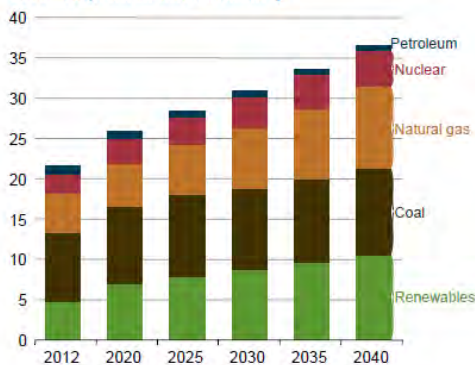
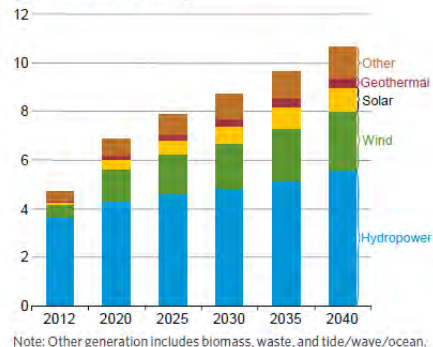


Figure 6. World net electricity generation from renewable power by fuel, 2012–40 (trillion kilowatthours)



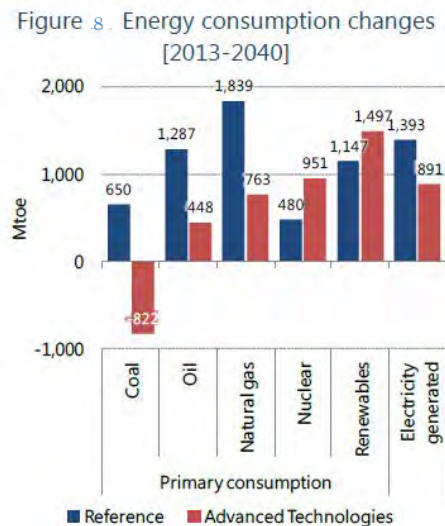
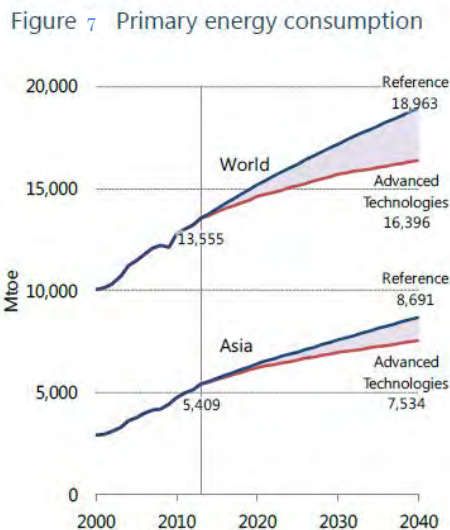
出典：International Energy Outlook 2016 (U.S. Energy Information Administration)

⁶ 太陽光発電が大幅に増加することで再生可能エネルギーの発電容量 (GW) が 2040 年には半数近くを占めるとの予測もある(BNEF)。

2. 世界のCO2排出量の展望⁷

IEEJの「アジア/世界エネルギーアウトック 2015」においては、一次エネルギーの消費量について、レファレンスケースの他に、現実社会での適用機会・受容性を踏まえた最大限のCO2排出削減対策を見込む「技術進展ケース」の予測もなされている。それによると、技術進展ケースにおける2040年のエネルギー消費量は、レファレンスケースに比して、世界全体で2,567Mtoeの削減となり、増加分が半減されている。また、アジア圏において1,157Mtoe（削減量の45%）が削減されると予測されている。

また、2013年～2040年のエネルギー消費量の変化を見ると、技術進展ケースでは石炭消費の変化が最も大きく、1,472Mtoeの減少となっている。これは、電力需要の減少、発電効率の向上、他エネルギーへの代替影響等によるものとされている。その他、石油や天然ガスなどの化石燃料においても、同様に大幅な消費量の減少が見込まれている。



出典：アジア/世界エネルギーアウトック 2015 (IEEJ)

(参考) IEEJ「アジア/世界エネルギーアウトック 2015」 技術進展ケースでの技術導入想定例

図 技術進展ケースにおける技術導入の想定例

需要サイドの技術	供給サイドの技術
<p>■ 産業部門</p> セクトラルアプローチ等により最高効率水準(ベストプラクティス)の産業プロセス技術(鉄鋼、セメント、紙パルプ、石油精製)が世界的に普及 <p>■ 運輸部門</p> クリーンエネルギー自動車(低燃費自動車、ハイブリッド自動車、プラグインハイブリッド自動車、電気自動車、燃料電池自動車)の普及拡大 <p>■ 民生部門</p> 省エネ家電(冷蔵庫、テレビ等)、高効率給湯器(ヒートポンプ等)、高効率空調機器、高効率照明の普及拡大、断熱強化	<p>■ 再生可能エネルギー</p> 風力発電、太陽光発電、太陽熱発電、バイオマス発電、バイオ燃料の普及拡大 <p>■ 原子力導入促進</p> 原子力発電建設加速化、設備利用率向上 <p>■ 高効率火力発電技術</p> 超々臨界圧石炭火力、石炭IGCC、石炭IGFC、天然ガスMACCの普及拡大 <p>■ 二酸化炭素回収・貯留(CCS)</p> 発電部門(石炭火力、ガス火力の新設、既設設備)、産業部門(鉄鋼、セメント等大規模排出源)での導入拡大

⁷ アジア/世界エネルギーアウトック 2015 日本エネルギー経済研究所 2015年10月

上記を前提として、同レポートでは世界のエネルギー起源 CO₂ 排出の予測を以下のとおりとしている。2050年におけるレファレンスケースでの CO₂ 排出量は 45.9Gt であるが、技術進展ケースでは二酸化炭素回収・貯留 (CCS) を加味すると 23.3Gt まで減少することになる。これは、現在の 32.9Gt の 7 割の排出量であり、省エネルギー及び CCS の貢献が大きい。

また、2030年の世界全体の温室効果ガス (GHG) 排出量では、主要 8カ国の自主的な削減案を元にした推計量 (INDC) はレファレンスケースに近いものとなっており、中国やインドなどの途上国における効果的な取組の強化が必要とされている。

Figure 9 Global CO₂ emissions and each measure's contribution to emission reductions

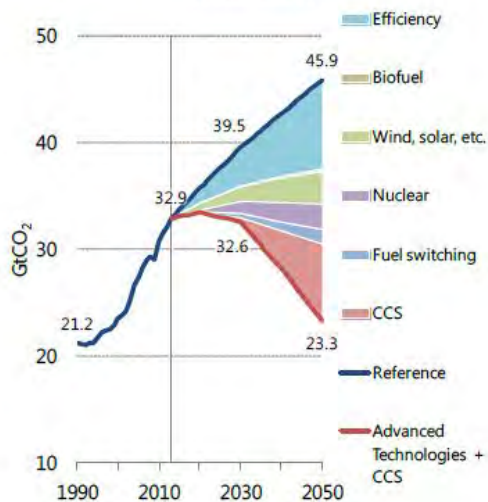
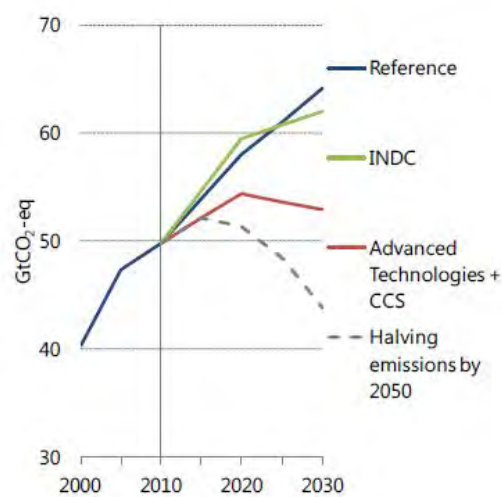


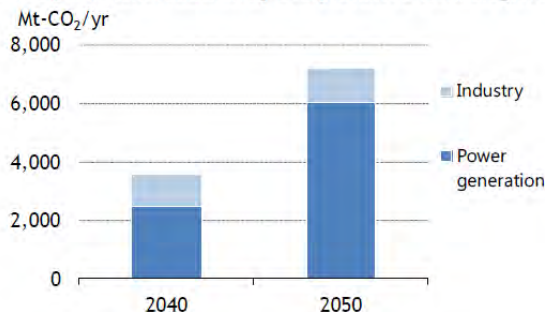
Figure 10 GHG emissions



出典：アジア／世界エネルギーアウトック 2015 (IEEJ)

なお、CCSについては世界全体で研究開発が進んでおり、大幅な CO₂ 削減には火力発電の導入のために必要不可欠な技術であると位置づけられている。IEEJの予測による CCS による CO₂ 削減量は以下のとおりであり、2040年で 3.6Gt、2050年で 7.2Gt に及び、特に発電部門における削減が大きく寄与すると予想されている。

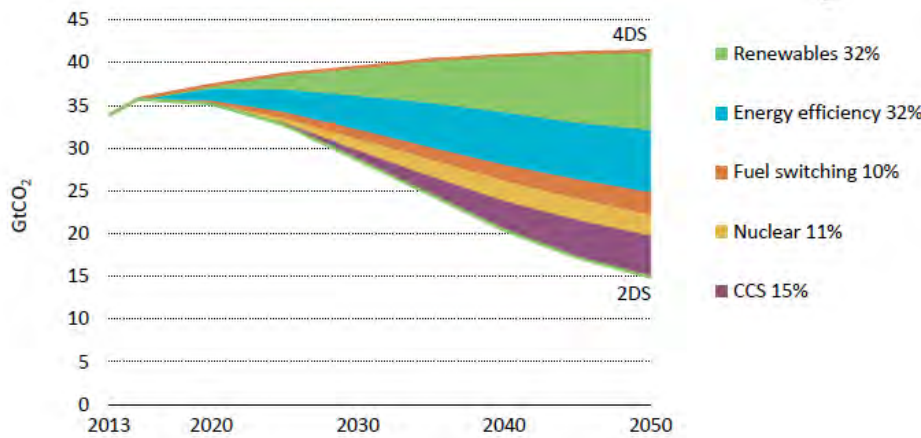
Figure 11 CO₂ emissions reduction by CCS [Advanced Technologies Scenario]



出典：アジア／世界エネルギーアウトック 2015 (IEEJ)

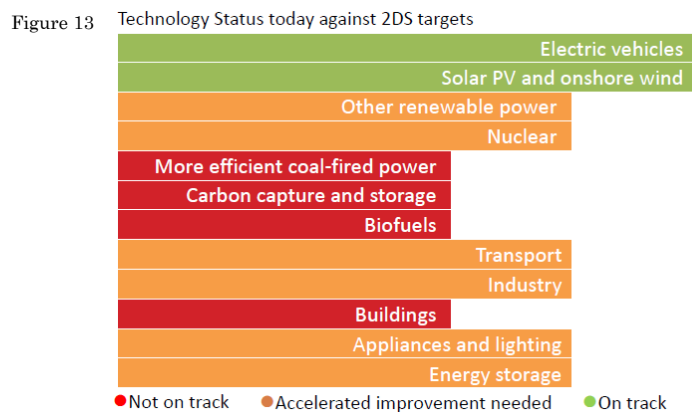
IEA の Energy Technology Perspectives 2016 における CO₂ 排出削減量の予測は以下のとおりであり、2050 年において 4℃シナリオ（4DS）から 2℃シナリオ（2DS）への削減対策として、再生可能エネルギー、省エネルギー、そして CCS などを大幅に導入する必要があると読み取れる。

図 12：CO₂ 排出削減量の予測



出典：Energy Technology Perspectives 2016（IEA）

また、同レポートにおいては 2℃シナリオ（2DS）への目標に対する現状の技術水準としては以下のとおりと考えられており、電気自動車、太陽光パネル、陸上風力発電以外は遅れていると指摘している。

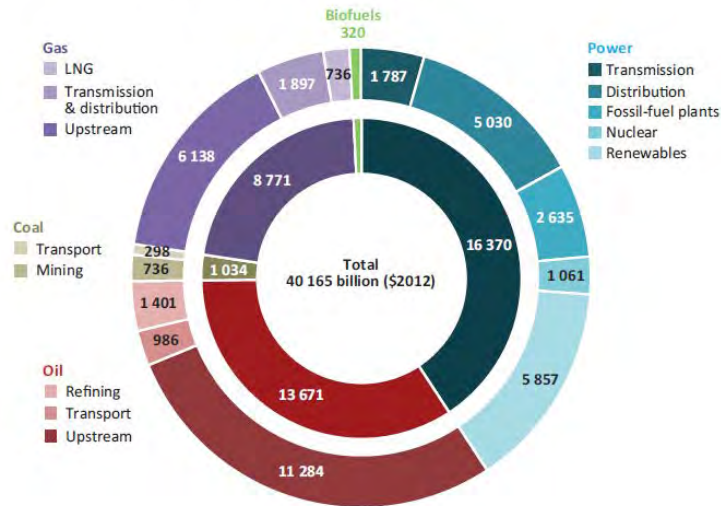


出典：Energy Technology Perspectives 2016（IEA）

3. 世界におけるエネルギー投資の展望⁸

IEAによる予測によると、新政策シナリオにおいて、2014年から2035年までの世界におけるエネルギー供給への投資は、全体で40兆ドルと見積もられ、内訳としては、発電事業、石油事業、天然ガス事業の順となっている。

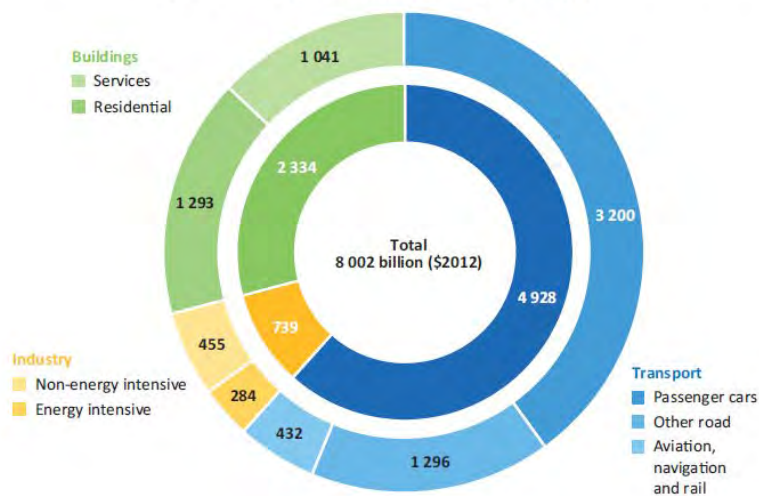
Figure 14 ▶ Cumulative global energy supply investment by type in the New Policies Scenario, 2014-2035



出典：WORLD ENERGY INVESTMENT OUTLOOK (IEA 2014)

また、同レポートによる2014年から2035年までの世界のエネルギー効率への投資は、全体で8兆ドルと見積もられ、内訳としては、交通分野と建築分野がほとんどを占め、産業分野の占める割合は小さくなっている。

Figure 15 ▶ Cumulative global energy efficiency investment by end-use sector in the New Policies Scenario, 2014-2035

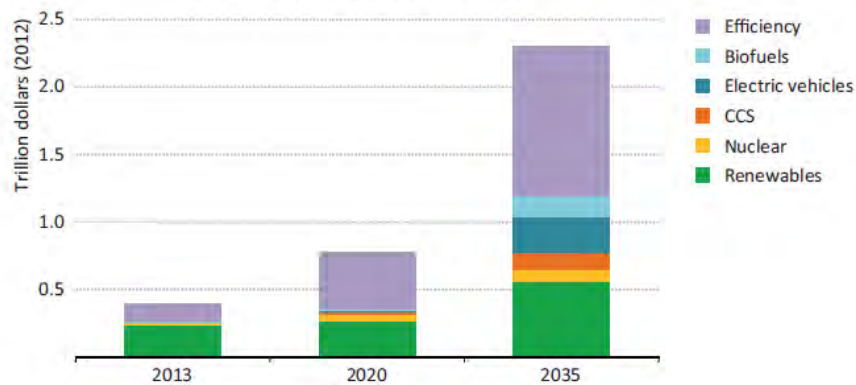


出典：WORLD ENERGY INVESTMENT OUTLOOK (IEA 2014)

⁸ WORLD ENERGY INVESTMENT OUTLOOK IEA 2014

一方、同レポートの 450 シナリオにおける低炭素技術とエネルギー効率への年間投資額は、2013年の3900億ドルから、2020年には7900億ドル、そして2035年には2.3兆ドルまで増加するとしている。また、2035年までの累計投資額は28.5兆ドルとされ、エネルギー効率が48%、再生可能エネルギー・原子力発電・バイオ燃料で40%を占めている。

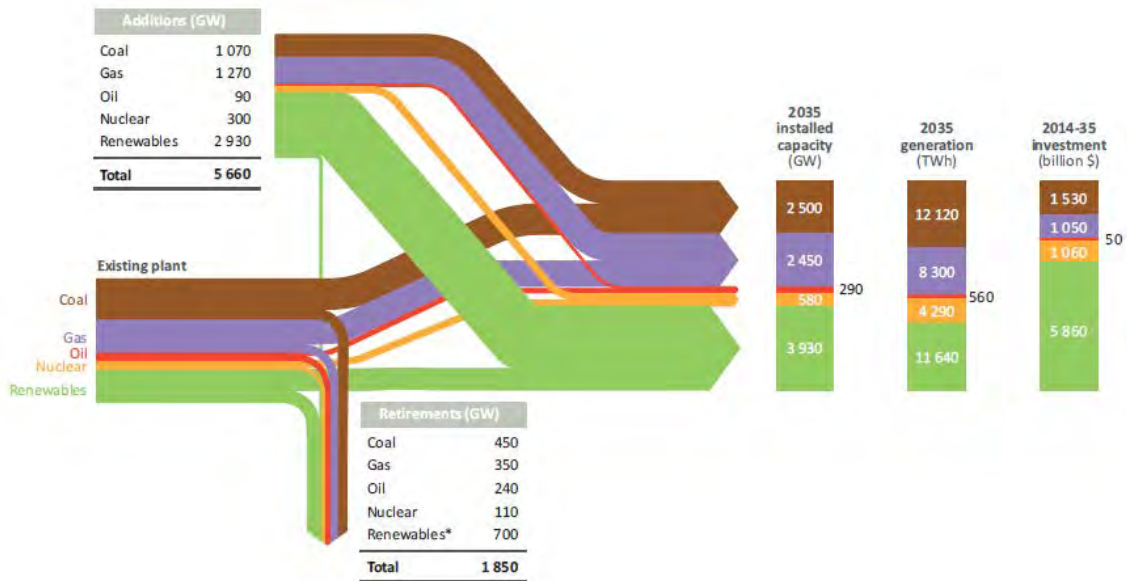
Figure 16 ▶ Global investment in low-carbon technologies and energy efficiency in the 450 Scenario



出典：WORLD ENERGY INVESTMENT OUTLOOK (IEA 2014)

同レポートの新政策シナリオにおける2014年から2035年の世界の電力発電容量のフロー及び投資額を見ると、以下のとおりである。新規に追加される発電源としては、石炭火力(1,070GW)及び天然ガス火力(1,270GW)よりも再生可能エネルギーが2,930GWと上回っており、投資額も再生可能エネルギーが5.8兆ドルと石炭火力(1.5兆ドル)及び天然ガス火力(1.0兆ドル)を大きく超過している。

Figure 17 > Power generation global capacity flows and investment, 2014-2035



Note: Over the projection period, a small portion of the renewables additions is retired following the lifetime assumption for wind and solar PV of 20-25 years

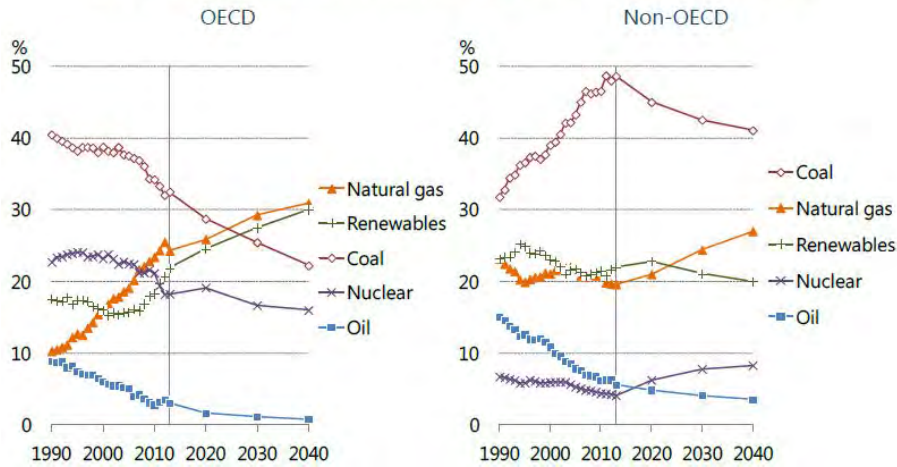
出典：WORLD ENERGY INVESTMENT OUTLOOK (IEA 2014)

4. 非 OECD 諸国における電力供給量の展望⁹

IEEJ の予測によると、レファレンスケースにおける OECD と非 OECD の電源構成は以下のとおりであり、2040 年までに OECD では石炭火力が発電量全体の 2 割くらいまで減少する一方、天然ガスと再生可能エネルギーがそれぞれ約 3 割まで増加する。非 OECD では、中国やインドなどの急速に伸びる電力需要に対して石炭火力が主要な電源となるため、シェアとしては減少するものの発電量全体に占める割合は 4 割強と高いものとなり、天然ガス火力の増加は OECD と同程度、また再生可能エネルギーは横ばいと予測されている。

⁹ アジア／世界エネルギーアウトック 2015 日本エネルギー経済研究所 2015年10月

Figure 18 Power generation mix for OECD and non-OECD [Reference Scenario]

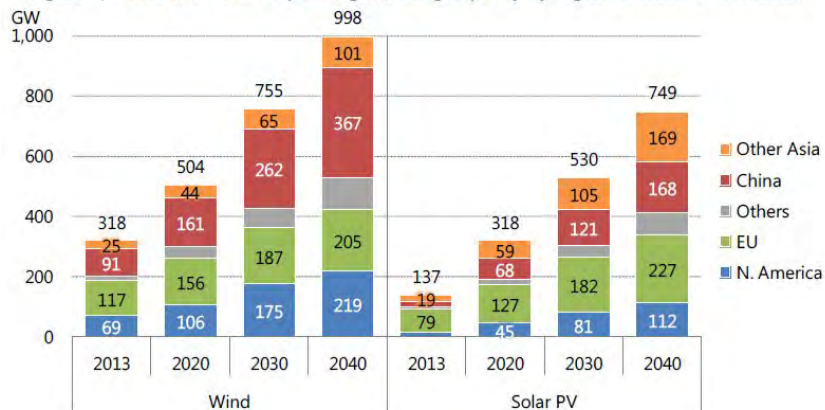


出典：アジア／世界エネルギーアウトック 2015 (IEEJ)

また、IEEJ 予測のレファレンスケースにおいて、風力発電と太陽光発電の導入量を地区別にみると、以下のとおりである。風力発電では、2040年において北米が対2013年比で約3倍(219GW)、EUが2倍に満たない(205GW)一方、中国が約4倍(367GW)及び他のアジア諸国が4倍(101GW)となる。中国は、世界全体の4割弱を占める主要な風力発電地帯となる。

太陽光発電についても、2040年までに北米及びEUにおいても増加するが中国及び他のアジア諸国の伸びが大きく、中国及び他のアジア諸国で世界全体の45%を占める。太陽光発電における発電コストは市場拡大や技術開発により徐々に低下していることや、各国における野心的な導入目標が設定されることもあり、今後とも拡大が期待される。

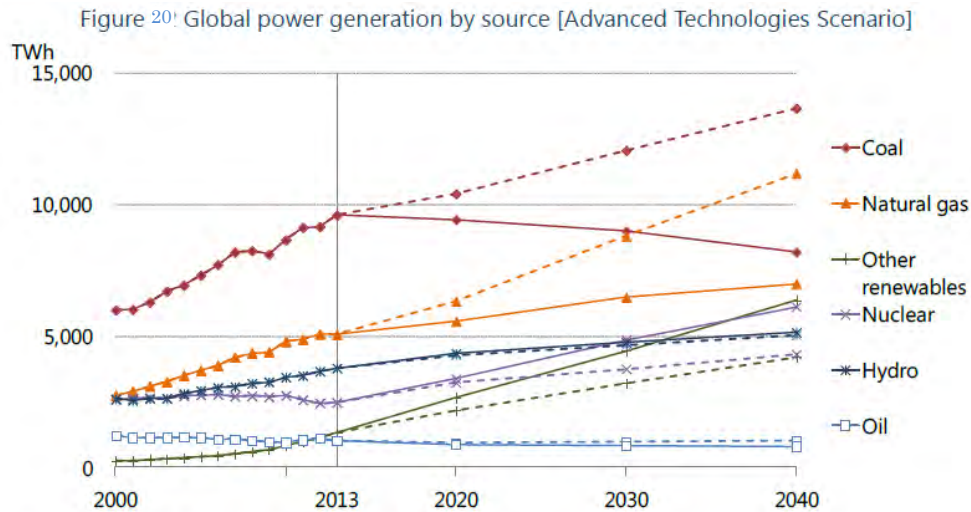
Figure 19 Wind and solar PV power generating capacity by region [Reference Scenario]



出典：アジア／世界エネルギーアウトック 2015 (IEEJ)

一方、前述した IEEJ 予測の技術進展ケースでは、発電構成も変化することになる。下図の実線における技術進展ケースの場合の発電量は、化石燃料による発電量を抑制する一方、再

生可能エネルギーの発電量を増加させることが分かる。この傾向は、アジア地域においても同様で石炭火力による発電量を大幅に抑えることができるが、電源構成に占める割合は、世界全体と比して高い。

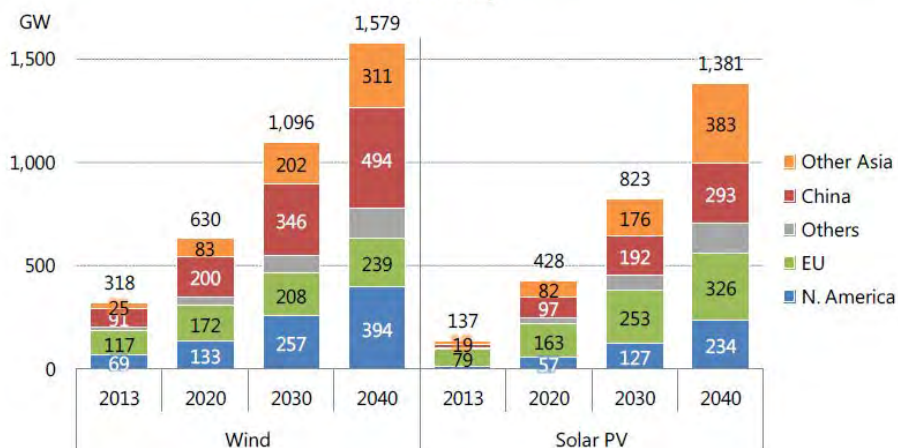


Note: Dashed lines represent the Reference Scenario

出典：アジア／世界エネルギーアウトック 2015 (IEEJ)

また、同レポートの技術進展ケースにおける 2040 年の風力発電と太陽光発電の設備容量は、レファレンスケースに比してそれぞれ約 1.6 倍と約 1.8 倍となる。陸上風力については、さらなるコスト削減と送配電インフラの整備等により、新興・途上国及び米国での導入が見込まれる。また、太陽光発電については、システムコストの低減により、中国、インド、中東、北アフリカ、中南米等のサンベルト地域のある新興・途上国において普及が拡大する。先進国では、太陽電池の価格低減と併せて小型蓄電池のコスト低減により、住宅用の分断型太陽光発電が普及すると予測されている。

Figure 21 Wind and solar PV power generating capacities by region [Advanced Technologies Scenario]

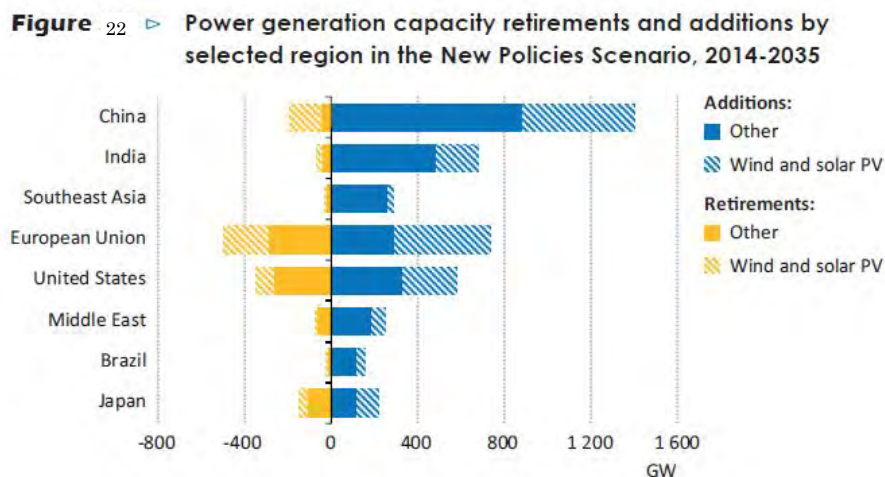


出典：アジア／世界エネルギーアウトック 2015 (IEEJ)

5. 非 OECD 諸国におけるエネルギー投資の展望¹⁰

前述した IEA 予測による新政策シナリオにおいて、2014–2035 年における発電能力への追加投資 (5,660GW) と廃棄 (1,850GW) を地域別にみたのが、以下のグラフである。追加投資の 3 分の 2 が非 OECD 国であり、電力需要への対応で増加している。特に中国は、2014–2035 年に 1,400GW を導入し、そのうち風力と太陽光が 37%、石炭火力が 28%を占めると予想されている。また、インドの追加投資の推定は 680GW であり、石炭火力がそのうち 40%を占めている。既存設備のリプレースが多い OECD 諸国に比して、非 OECD では新規増設がほとんどとなるのが特徴的である。

ちなみに、EU においてはリプレース、再生可能エネルギーの大規模開発、システムの信頼性を確実なものにするための化石燃料により、740GW が追加投資される。また、米国では、リプレース (ガス火力発電が 1/3)、風力、太陽光等の投資となる。



出典：WORLD ENERGY INVESTMENT OUTLOOK (IEA 2014)

(参考) IEA における発電プラントの耐用年数の前提

発電プラントの耐用年数は技術及び経済的条件により、以下のように見積もっている。

○技術的耐用年数は発電プラントの設計耐用年数となる。

水力…70年、石炭火力…50年、原子力…40–60年、ガス火力…40年、風力及び太陽光…20–25年、

○経済的耐用年数は、技術的耐用年数よりも通常短くなる。また、規制がない状態で運営している場合には、よりリスクが高まることから投資回収期間は短くなる。

なお、同予測の前提とした地域別の電力需要の年平均成長率、追加発電能力、送配電線の新設・更新は以下のとおりである。非 OECD において、経済成長に伴う旺盛な電力需要により年平均成長率は全体で 3.2%となり、特にインドが 5.0%、東南アジアが 4.1%と高く、中国、

¹⁰ WORLD ENERGY INVESTMENT OUTLOOK IEA 2014年

中東、中南米、アフリカも 3.0%前後の伸びが予測されている。

この需要を満たすための発電所の増設（非 OECD 合計 3,749GW）には、送電網の整備が不可欠であり、これにより新規顧客への送配電や質の高い電力供給が可能となる。2014–2035 年で全送電線の追加投資 3.2 百 km の約 8 割に当たる 2.6 百 km が非 OECD 諸国であり、また全配電線の追加投資（24.2 百 km）の約 8 割強となる 20.3 百 km が非 OECD での投資と予測されている。送配電線の更新投資については、非 OECD 及び OECD のいずれにおいても同程度の投資が見込まれている。送配電線の耐用年数は 40 年と見積られ、2035 年までに欧米諸国などで多くの送配電線が耐用年数に到達すると考えられる。

Table 1 Electricity demand, generation capacity and T&D line lengths in the New Policies Scenario

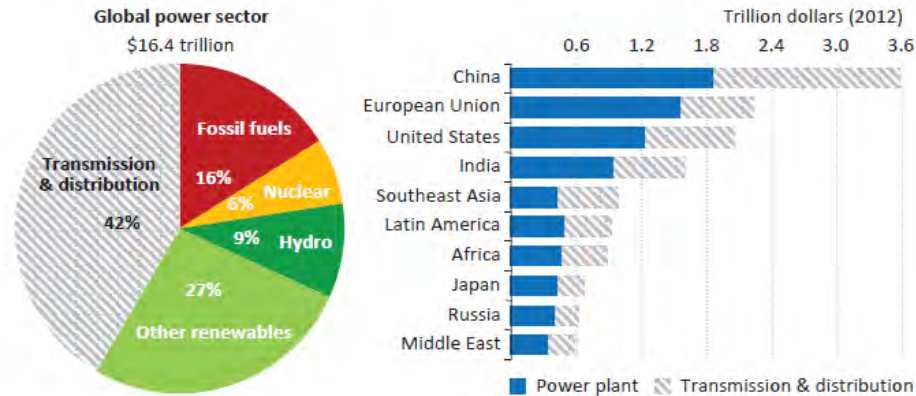
	Electricity demand CAAGR 2012-35	Capacity Additions (GW) 2014-35*	Transmission lines (thousand km)		Distribution lines (thousand km)	
			Additions 2014-35*	Refurb. 2014-35*	Additions 2014-35*	Refurb. 2014-35*
OECD	0.9%	1 908	541	1 356	3 845	14 219
Americas	1.1%	757	342	760	1 754	5 780
United States	1.0%	579	260	611	1 326	4 873
Europe	0.7%	799	144	421	1 208	5 492
Asia Oceania	0.8%	352	54	175	884	2 947
Japan	0.5%	218	20	110	358	1 960
Non-OECD	3.2%	3 749	2 639	1 650	20 389	17 481
E. Europe/Eurasia	1.6%	373	145	406	1 054	2 963
Russia	1.7%	221	89	262	484	1 004
Asia	3.6%	2 559	1 650	802	13 516	11 117
China	3.2%	1 400	1 035	499	5 395	5 597
India	5.0%	681	277	167	3 097	3 796
Southeast Asia	4.1%	291	240	85	3 735	1 140
Middle East	3.1%	249	148	103	1 314	682
Africa	3.4%	290	377	133	2 360	903
Latin America	2.7%	277	319	205	2 145	1 816
Brazil	3.0%	158	228	135	1 363	948
World	2.2%	5 657	3 180	3 007	24 234	31 700
European Union	0.6%	738	119	388	857	5 201

*Cumulative over the period. Notes: CAAGR = compound average annual growth rate; refurb. = refurbishments.

出典：WORLD ENERGY INVESTMENT OUTLOOK (IEA 2014)

上記の前提を元に推計された新政策シナリオによる 2014–2035 年の電力部門への投資総額は 16.4 兆ドルであり、年間必要投資額は 7,400 億ドルとなっている。その内訳としては、送配電網が 42%、再生可能エネルギー（水力を除く）が 27%、化石火力が 16%となっている。また、地域別にみると、2014–2035 年の累積投資額は中国で 3.6 兆ドル、EU が 2.2 兆ドル、米国が 2.1 兆ドル、インドが 1.6 兆ドル、そして東南アジアが 1.0 兆ドルとなっている。

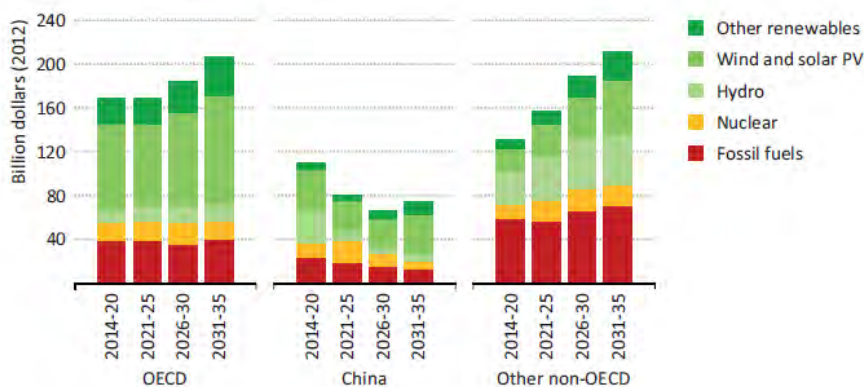
Figure 23 ▶ Cumulative global power sector investment by type and selected region in the New Policies Scenario, 2014-2035



出典：WORLD ENERGY INVESTMENT OUTLOOK (IEA 2014)

なお、OECD 及び中国、他の非 OECD における発電設備への年間平均投資額（2014－2035年）は次のとおりであり、中国と他の非 OECD とは投資推移が異なっている。中国では発電設備容量が電力需要を満たすことから、年間平均投資額が減少していく。一方、他の非 OECD では火力、水力、風力・太陽光ともに年間投資額は純増していく。

Figure 24 ▶ Average annual investment in power plants by type in the New Policies Scenario



出典：WORLD ENERGY INVESTMENT OUTLOOK (IEA 2014)

なお、発電設備への累計投資額（2014－2035年）では、火力・水力・原子力への投資が54%を占めており、残りの大半は風力と太陽光となっている。

II. 先進的低炭素エネルギー技術の技術開発・導入動向

本章では、様々な先進的低炭素エネルギー技術に関して、日本及び海外における開発・導入動向について説明する。それらの概要を取りまとめたものは、以下のとおりである。

LCE技術の類型化	詳細項目	日本での開発・導入の必要性	日本における技術動向	国内企業	他国の主な研究開発動向
太陽光	シリコン系、化合物系、有機系	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー安全保障 経済効果 他産業への波及効果 2030年導入目標: 64GW 	<ul style="list-style-type: none"> ヘテロ接合型: パナソニック、カネカ 薄膜シリコン型: 産総研 CIS系: ソーラーフロンティア、NEDO III-V族(3接合)型: シャープ ペロブスカイト型: NEDO、NIMS 有機薄膜: 三菱化学、住友化学 2030年コスト削減目標: 7円/kWh 	三菱電機、シャープ、パナソニック、京セラ、ソーラーフロンティア、カネカ、ほか	<p>アメリカ</p> <ul style="list-style-type: none"> 全般: NREL 結晶シリコン型: NREL、MIT ペロブスカイト型: プリンストン、UCバークレー <p>ヨーロッパ</p> <ul style="list-style-type: none"> 全般: EP7、Horizon 2020 集光型: Fraunhofer(ドイツ)、Soitec(フランス) ペロブスカイト型: EPFL(スイス)
地熱	フラッシュ方式、バイナリー方式、EGS、超臨界地熱資源(マグマ)	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー安全保障 地熱資源の存在 日本企業の競争力 2030年導入目標: 1.4-1.6GW 	<ul style="list-style-type: none"> フラッシュ方式: 動きなし バイナリー方式: NEDO 資源探査、管理、掘削: JOGMEC EGS、超臨界: 産総研 	三菱重工、東芝、富士電機、ほか	<p>アメリカ</p> <ul style="list-style-type: none"> EGSなど: DOE(EERE)、FORGEプログラム <p>ヨーロッパ</p> <ul style="list-style-type: none"> EGSなど: FP7、Horizon 2020、EGEC
陸上風力		<ul style="list-style-type: none"> エネルギー安全保障 市場規模(世界) 発電コスト(再エネの中では安価) 2030年目標: 9.18GW 	<ul style="list-style-type: none"> 二次巻線型誘導発電機が主流に 風力発電高度実用化研究開発: NEDO 	三菱重工、日立製作所、東芝、日本製鋼所、ほか	<ul style="list-style-type: none"> 大型化、効率化: DOE、NRELなど(アメリカ)、FP7、Horizon 2020など(ヨーロッパ) 系統制御: CECRE(スペイン)
洋上風力	着床式、浮体式	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー安全保障 土地制約の解消 風況 2030年目標: 0.82GW 	<ul style="list-style-type: none"> 実用化はほぼ全て着床式 崎山漁港沖(長崎)で浮体式実用化 五島フローティングウインドパワー 洋上風力発電等技術研究開発: NEDO 	三菱重工、日本製鋼所、東芝、日立製作所、ほか	<p>アメリカ</p> <ul style="list-style-type: none"> 実用化には遅れ(訴訟) 風海況観測: DOE、PNNL、NOAA <p>ヨーロッパ</p> <ul style="list-style-type: none"> 着床式および関連技術: ORE Catapult(英)、LORC(デンマーク)、Fraunhofer(独)など 全般: FP7、Horizon 2020
高効率火力	USC、A-USC、IGFC、IGCC、AHAT、GTCC、GTFC	<p>【石炭火力】</p> <ul style="list-style-type: none"> 安定供給性(埋蔵量が多く、埋蔵場所も一極集中していない) 経済性(化石燃料で最安) GHGが多い 2030年26% <p>【LNG火力】</p> <ul style="list-style-type: none"> GHGが少ない 他産業への波及効果(高度利用、利用形態の多様化) 2030年27% 	<p>【石炭火力】</p> <ul style="list-style-type: none"> USCは実用化が進み、国内石炭火力の約半分(設備容量ベース) A-USCは、技術確立は2016年度頃を目途 空気吹きIGCCは、商用転用化(2012年) 大崎ケルジエンでは、酸素吹きIGCCにCCS分離・回収設備及び燃料電池を組み込んだOGFCについても検討 <p>【天然ガス火力】</p> <ul style="list-style-type: none"> GTCCの1600℃級は商用運転を開始し、1700℃級の技術確立は2020年度頃を目途 AHATは2020年度頃に51%の発電効率実現を目標 	三菱日立パワーシステムズ、東芝、IHI、富士電機、川崎重工	<p>【石炭火力】</p> <p>欧州</p> <ul style="list-style-type: none"> AD700プロジェクト(A-USC実現に向けた各種要素試験) CCS、IGCCの推進に向けた資金支援プログラムを導入 USC、A-USCでは企業参加による共同開発を推進 CCSは2020年以降の商業実用化を目標 米国 500~600MW級のIGCC建設が進行 <p>【天然ガス火力】</p> <p>欧州</p> <ul style="list-style-type: none"> CAME-GTで高効率ガスタービンの開発が推進 第7次技術開発枠組計画(FP7)の中で研究開発を実施 <p>米国</p> <ul style="list-style-type: none"> 高効率エンジン・タービンプロジェクト(HEET)の中で技術開発

LCE技術の類型化	詳細項目	日本での開発・導入の必要性	日本における技術動向	国内企業	他国の主な研究開発動向
CCS・CCU	温暖化対策	<ul style="list-style-type: none"> 化石燃料から排出されるCO2を回収・利用するため 気候変動対策 	<ul style="list-style-type: none"> CCSの分離技術のコストは2030年代に現在の1/4の1000円台/tCO2にする目標(経済産業省) 	<ul style="list-style-type: none"> エンジニアリング会社として日揮、千代田化工、東洋エンジニアリング他、 電力事業では三菱重工、日立(現、三菱日立パワーシステムズ)、IHI、東芝他 製鉄関係では新日鉄住金エンジニアリング 貯留分野では大成建設や鹿島建設 	<p>世界では10個のCCS-EORプロジェクトが稼働中で、年間の分離圧入のCO2数量は2,500万トン</p>
蓄電池(系統用)	鉛蓄電池、NAS電池、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池、(バナジウム)レドックスフロー電池、ナトリウムイオン電池	<ul style="list-style-type: none"> ピーク需要対策 電気代節約 系統安定化 再エネ受入可能量増 電気自動車 2020年目標:世界シェア50% 	<ul style="list-style-type: none"> 研究支援:NEDO 鉛:GSユアサほか NAS:日本ガイシ、東京電力 ニッケル水素:産総研ほか リチウムイオン:産総研、トヨタ、東工大(2016年)ほか レドックスフロー:住友電工 試験場:NITE(大阪) 	<p>GSユアサ、日本ガイシ、パナソニック、川崎重工業、日立マクセル、NEC、東芝、住友電工</p> <p>※ソニーは撤退</p>	<p>アメリカ</p> <ul style="list-style-type: none"> リチウムイオン、リチウム空気: NREL, MIT 有機フロー電池:ハーバード <p>ヨーロッパ</p> <ul style="list-style-type: none"> 全般:FP7, Horizon 2020 リチウムイオンなど:ALISTORE ERI, SAFT(フランス)、Franhofer(ドイツ)など <p>中国</p> <ul style="list-style-type: none"> リチウムイオンなど:SIAT, DICP <p>韓国</p> <ul style="list-style-type: none"> リチウムイオン:サムスン、LG化学
水素・燃料電池・アンモニア	PEFC, SOFC, PAFC	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー安全保障 省エネ 環境性 	<p>PEFC:トヨタ自動車(燃料電池自動車)</p> <p>SOFC:エネファーム</p>	<p>定置用燃料電池</p> <p>PEFC:パナソニック、東芝</p> <p>SOFC:京セラ、アイシン精機、三浦工業、三菱日立パワーシステムズ</p> <p>PAFC:富士電機</p> <p>燃料電池自動車:トヨタ、ホンダ</p> <p>水素:JX、東京ガス、大阪ガス、JPOWER、旭化成、東レ、川崎重工、千代田化工建設、岩谷産業、日揮</p> <p>アンモニア:日揮、千代田化工建設、日本触媒、三井化学、トクヤマ、IHI、大陽日酸、宇部興産</p>	<p>アメリカ:DOE</p> <p>欧州:NOWのNIPの中で家庭用燃料電池の実証実験、DENA(ドイツ)、ene.field</p>
次世代照明(LED)		<ul style="list-style-type: none"> 省エネ 温暖化対策 	<ul style="list-style-type: none"> 2020年までにフローで100%、2030年までにストックで100%普及計画 	<p>パナソニック、東芝ライテック、NECライティング、遠藤照明、岩崎電気、</p>	<ul style="list-style-type: none"> 米DOEはLEDに対して2015年に200lm/W、80 Raという目標が設定、有機ELに対して150 lm/W、15万時間という目標が設定 欧州の研究助成資金であるFP7の下LEDの高効率化や製造コストの低減プロジェクト

LCE技術の類型化	詳細項目	日本での開発・導入の必要性	日本における技術動向	国内企業	他国の主な研究開発動向
需給システム -スマートコミュニティ		<ul style="list-style-type: none"> 再生可能エネルギー増と次世代自動車等への対応と電力の安定供給の必要性 分散型エネルギーシステムにおけるエネルギー需給を総合的に管理 	<p>2010年4月から2015年3月までに「次世代エネルギー・社会システム実証事業」が行われ、全国19地域からの応募から、横浜市、豊田市、けいはんな学研都市(京都府)と北九州市が選定された。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 2010年4月官民連携組織「スマートコミュニティアライアンス」を設立、電力、重電・機器メーカ、IT、不動産デベロッパー、大学、研究機関、自治体など約300社から構成 東芝は国内外で既に30以上ものスマートコミュニティプロジェクトに参画 	<ul style="list-style-type: none"> 米国は老朽化した送配電網の改善策としつつ、「スマートシティニアタイプ」(2015)で要素技術のIoTや自動運転などが重視 EUは系統安定性と再生可能導入を目的として、2011年に「スマートシティ・スマートコミュニティ産業界イニシアティブ」で輸送とエネルギー分野の実証事業、2012年「スマートシティ・コミュニティ欧州イノベーション・パートナーシップ」で都市エネルギー、交通、情報通信分野のスマート技術開発を支援
-スマートグリッド		<ul style="list-style-type: none"> 再生可能エネルギー増と次世代自動車等への対応と電力の安定供給の必要性 	<p>エネルギー・環境会議(2011年7月29日)における「今後5年以内に総需要の8割をスマートメーター化する」との目標に向け、2012年2月時点で約130万個のスマートメーターが設置。2016年末1222万台計画。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 日立は日本風力開発株式会社、トヨタ自動車株式会社とパナソニック電工の3社と連携し2010年9月から2年間六ヶ所村スマートグリッド実証事業を実施した。 東京電力、伊藤忠商事、東京工業大学などと共同で2010年度から次世代送電システム「日本版スマートグリッド」構築に向けた実証実験を実施。 東芝は、横浜において2014年までの期間で次世代エネルギー・社会システム実証や宮古島における離島マイクログリッド実証実験 	<ul style="list-style-type: none"> 米国はDOE主導でスマートグリッド投資補助金プログラム(Smart Grid Investment Grants、SGIG)とスマートグリッド実証事業(Smart Grid Demonstration Project、SGDP)を実施、送電線網の近代化、サイバーセキュリティの強化、系統相互運用のパフォーマンスを向上。 EUは、2010年のEU成長戦略「欧州2020」において次世代エネルギーネットワーク「スマートグリッド」の導入とEU域内と周辺地域の相互接続等のインフラの近代化を実現するため欧州委員会は2011年スマートグリッドの普及に向けた計画を発表し、10%程度普及となったスマートメーター設置率を2020年までに80%に、2022年までに100%に到達させる目標
-デマンド・レスポンス	出力調整、FACTS、PCS制御、需給運用、広域運用、発電予測	<ul style="list-style-type: none"> 福島事故後集中型エネルギーシステムの脆弱性の克服と再生可能エネルギーの導入拡大に伴い電力品質の確保 省エネと節電の必要性 電気需要の平準化 	<ul style="list-style-type: none"> 電気料金型 インセンティブ型(ネガワット取引) 	<ul style="list-style-type: none"> デマンドレスポンス推進協議会(DRC)の参加アグリゲーター、アズビル、エナノック、エナジーホールジャパン、ダイキン、京セラ、双日、東芝、日立、丸紅、三菱電機 	<ul style="list-style-type: none"> カリフォルニア州PG&E(Pacific Gas & Electric)は2007年からの累計で30万軒参加 オクラホマ州 OG&E(Oklahoma Gas & Electric)2012年末で4万2000世帯が参加、 米PHI(Pepco Holdings Inc)一般家庭中心に約35万件の需要家に参加 欧州は産業と業務需要家向けを中心に実施、米国と比べ進展が遅れ、規模も小さい。2015年には英国、スイス、ベルギー、アイルランド、フィンランドとフランスの合計6カ国と報告されている
-BEMS,HEMS		<ul style="list-style-type: none"> 徹底した省エネルギー社会の実現 ZEH(Zero Energy House)の新築100%普及目標 新築建築物の省エネ基準の義務化 	<ul style="list-style-type: none"> BEMSで建物全体で約10%の省エネ(電子情報技術産業協会の試算) 	<ul style="list-style-type: none"> パナソニックが「時間帯別電気料金情報に基づいて複数の電気機器の予約運転を行う制御システム等」や「配電システム」、「非接触電力伝送回路」等開発 東芝は「非接触型の充電等」や「予備力計算装置等」等開発 中国電力「電力系統における電力調整方法・装置」、「非接触給電システム、給電装置等」等開発 BEMSは国内ではアズビル、ジョンソン・コントロールズが2大事業者 	
-系統連系(超電導送電、HVAC、HVDC、低ロス送電線)		<ul style="list-style-type: none"> 送配電の損失の削減 大容量送電の必要 交直流変換によるロス削減 	<ul style="list-style-type: none"> 低ロス送電線技術として、Low Electrical Power Loss Aluminum Conductors Aluminum-Clad Steel Reinforced(LL-ACSR/AS)や Thermal Resistant Aluminum Alloy Conductors Steel Reinforced LL-TACSR/ASの日本の技術で同径電線よりアルミ部分の断面積を増やすことで電気抵抗を低減している。 	<ul style="list-style-type: none"> 電線大手:住友電気工業、古河電気工業、フジクラ 高温超電導線材(ビスマス系(Bi)系線材)は住友電気工業、住友電気工業(製造工程独占) 高温超電導の冷凍システム前川製作所、太陽日酸、 	<ul style="list-style-type: none"> 米国ではConEdison社が170m級の超電導ケーブルを建設する計画が進んでいる ドイツではAmpaCityプロジェクトで1kmの三相同軸型超電導交流ケーブルを開発する計画 高温超電導線材(ビスマス系(Bi)系線材)Bruker(ドイツ) 高温超電導の冷凍システムAir Liquide(フランス)
-分散型電源管理システム(DERMS)、バーチャルパワープラント(VPP)		<ul style="list-style-type: none"> 再エネの増加に伴う系統信頼性と安定化への対応 再エネの導入を拡大 	<p>2016年より補助金事業としてVPPの実証事業が開始された。同事業にて、平成28年から平成32年までの5年間の事業を通じて、50MW以上の仮想発電所の制御技術の確立等を目指し、更なる再生可能エネルギー導入拡大を推進している。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 関西VPPプロジェクトでは関西電力、富士電機、GSユアサ、住友電気、日本ユニシス、NTTスマイルエナジー、エネゲート、エリーパワー等10数社参加。 	<ul style="list-style-type: none"> 米国は電力市場の構造変化に対応するため、容量市場の構築に従ってDRを含めたDERMS技術を駆使したVPP企業が成長 カリフォルニアのDERの所有や運用を行う事業者「DERプロバイダー」が市場に参加できる制度の導入を進めている。 ドイツNEXT KRAFTWERKE社が「マーケット・プレミアム」制度を活用して1000カ所を超える発電設備を束ねるVPPと成長。

1. 太陽光発電

1.1. 開発・導入の必要性

(1) エネルギー安全保障

福島事故後、6%程度まで低下した日本のエネルギー自給率の改善は、日本のエネルギー安全保障の根幹である。2015年に発表された「長期エネルギー需給見通し」では、エネルギー自給率を2030年に25%程度まで引き上げることを目標の一つとしている。その達成にあたって、国産エネルギー資源を活用できる太陽光発電は不可欠なものとなる。再生可能エネルギーのなかでも木質バイオマス発電などは多くの燃料を輸入に依存することになる懸念が拭えないが、燃料を使用せず発電を続けられる太陽光発電は確実にエネルギー自給率向上に寄与する。上記の性質は日本以外の国々にとっても同じく重要なものとなる。

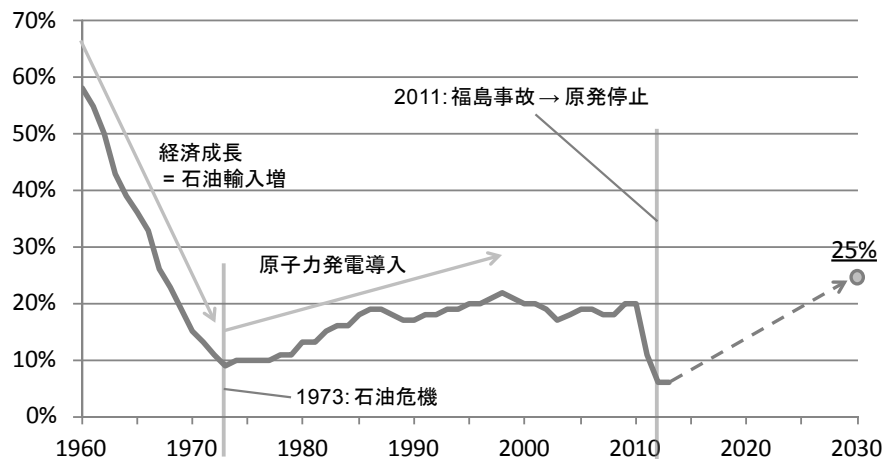


図 1 日本のエネルギー自給率の推移

出典：IEA, World Energy Statistics and Balances 2015 より作成

(2) 経済効果

日本では2015年の再生可能エネルギー分野での年間投資額が約362億ドル（研究開発を除く）となっており、うち約88%が小規模太陽光発電プロジェクトに対する投資となっている¹。全世界の総投資額は、再生可能エネルギー分野全体で約2,860億²ドル、太陽光発電分野で約1,610億ドル³となっている。

また、日本では太陽光発電関連産業によって、約37万7千人（再生可能エネルギー全体で約38万8千人）分の雇用が、全世界では約277万2千人（再生可能エネルギー全体で約805万2千人）分の雇用が創出されている⁴。

(3) 他産業への波及効果

¹ REN21, “Renewables 2016: Global Status Report,” 2016, p.102.

² *Ibid.*, p.99.

³ *Ibid.*, p.103.

⁴ *Ibid.*, p.41.

太陽光発電事業は多数の他産業と関連しており、その市場の活性化はそれら他産業にも波及効果をもたらす。製造段階および流通段階での他産業との関わりを示したものが図2および図3である。

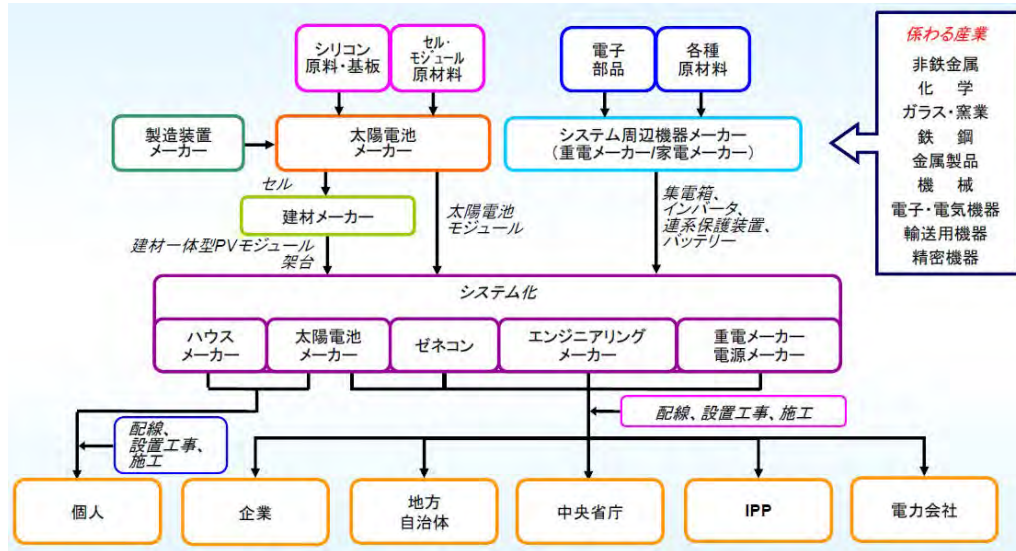


図2 太陽光発電システムに係る産業（製造段階）

出典：資源総合システム「太陽光発電産業について」第15回新エネルギー部会, 2006.

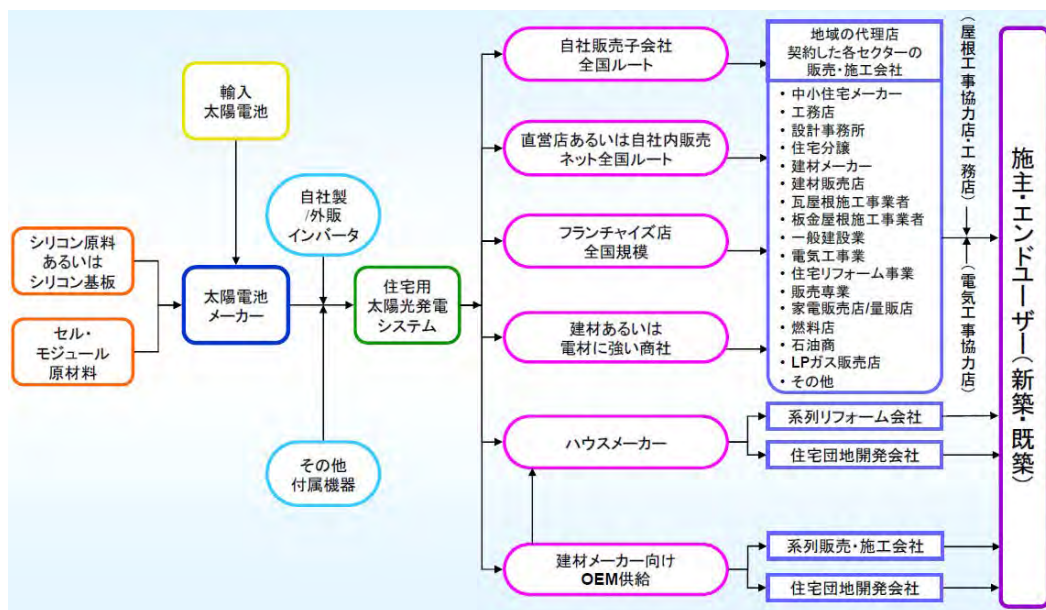


図3 住宅用太陽光発電システム（10kW以下）流通構造

出典：資源総合システム「太陽光発電産業について」第15回新エネルギー部会, 2006.

(4) 現在の導入量および導入目標

図4の通り、日本では近年になって急激に太陽光発電の導入量が急増している。これは主に、2012年から実施されている固定価格買取制度（Feed-in Tarff, FIT）の支援による効果である。

2014年の時点で累積設備容量は23.3GW⁵に達しており、ドイツ、中国に次いで世界第3位となっている。「長期エネルギー需給見通し」ではエネルギー自給率や温室効果ガス排出量削減の観点から再生可能エネルギー発電を今後の重要なエネルギー源と位置付けており、2030年度の総発電量の22-24%にあたる237-252TWh程度を再生可能エネルギーによって、うち7.0%にあたる75TWh（64GW相当）程度を太陽光発電でまかなうとしている。

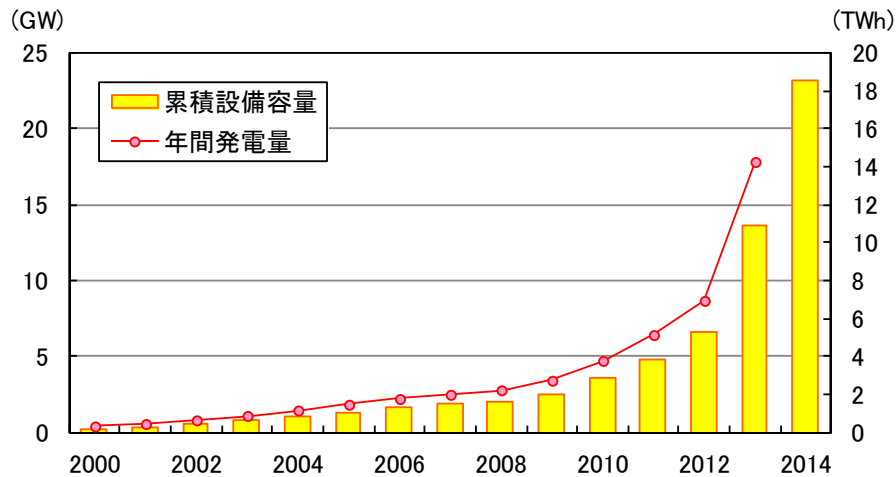


図4 太陽光発電の設備容量および発電量推移

出典：(設備容量) IRENA データベース
(発電量) IEA, World Energy Statistics and Balances 2015 より作成

表1 2030年度における太陽光発電の導入見込量

	設備容量	発電量
住宅用	9GW	9.5TWh
非住宅用	55GW	65.4TWh
合計	64GW	74.9TWh

出典：経済産業省「長期エネルギー需給見通し 関連資料」2015より作成

1.2. 国内の技術開発動向

太陽光発電システムの中核をなす太陽電池には、大きく分けるとシリコン系、化合物系、有機系といった種類があり、それぞれの特徴は

⁵ IRENA データベースより

表 2 のようになっている。ここでは日本における各種の技術開発動向について述べると同時に、表 2 に太陽電池の種類別の変換効率の推移を示す。

表 2 太陽電池セルの種類と特徴

種類		特徴	最大変換効率(セル)	主要メーカー
シリコン系	単結晶	<ul style="list-style-type: none"> 160-200 μm程度の薄い単結晶シリコン基板を用いる 特徴:性能、信頼性 課題:低コスト化 	約25%	シャープ、三菱電機、パナソニック、Yingli(中)、JA Solar(中)、Trina(中)、Hanwha-Qcells(韓独)
	多結晶	<ul style="list-style-type: none"> 小さな結晶が集まった多結晶の基盤を使用 特徴:単結晶より安価 課題:単結晶より効率が低い 	約21%	京セラ、シャープ、三菱電機、Yingli(中)、Trina(中)、JA Solar(中)
	薄膜系	<ul style="list-style-type: none"> アモルファス(非晶質)シリコンや微結晶シリコン薄膜を基板上に形成 特徴:大面積で量産可能 課題:効率が低い 	約14%	カネカ、シャープ、富士電機、GS Solar(中)、NexPower(台)
化合物系	CIS系	<ul style="list-style-type: none"> 銅、インジウム、セレンなどを原料とする薄膜型 特徴:省資源、量産可能、高性能の可能性 課題:インジウムの資源量 	約22%	ソーラーフロンティア、Hanergy(中)、MiaSole(米)
	CdTe系	<ul style="list-style-type: none"> カドミウム、テルルを原料とする薄膜型 特徴:省資源、量産可能、低コスト 課題:カドミウムの毒性 	約22%	First Solar(米)
	III-V族系	<ul style="list-style-type: none"> III族元素とV族元素からなる化合物セルに多接合・集光技術を適用 特徴:超高性能 課題:低コスト化 	約38%	シャープ、Amonix(米)、Soitec(仏)
有機系	色素増感・ペロブスカイト	<ul style="list-style-type: none"> 酸化チタンに吸着した色素が光を吸収し、発電する新しいタイプ 特徴:低コスト化の可能性 課題:耐久性 	約22%	アイシン精機、シャープ、フジクラ、G24innovations(英)、Dysol(豪)
	有機薄膜	<ul style="list-style-type: none"> 有機半導体を用いて、塗布のみで作成可能 特徴:低コスト化の可能性 課題:高効率化、耐久性 	約12%	三菱化学、住友化学、JXエネルギー、Heliatek(独)

出典：NEDO『NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版』2014, p.II-7 および NREL, Research Cell Efficiency Records, Apr. 2016 より作成

(1) シリコン系

結晶シリコン系太陽電池には、シリコン半導体基板を原料とする単結晶・多結晶シリコン太陽電池のほか、アモルファス(非晶質)薄膜シリコン太陽電池が含まれる。近年ではパナソニックが、結晶シリコン基板とアモルファスシリコン膜を組み合わせたヘテロ接合型太陽電池によって、セル変換効率 25.6%、モジュール変換効率 23.8%を達成し、アメリカの SunPower を抜いて世界記録を更新した⁶。また、カネカも両面電極型ヘテロ接合結晶シリコン太陽電池でセル変換効率 25.1%を達成し、この型の太陽電池で変換効率世界第一位を記録した⁷。変換効率の低さが課題とされている薄膜シリコン型についても、産業総合研究所によって 13.6%⁸が記録されている。

⁶ 2016年3月2日付パナソニックプレスリリース (<http://news.panasonic.com/jp/press/data/2016/03/jn160302-1/jn160302-1.html>)

⁷ 2015年10月23日付カネカプレスリリース (<http://www.kaneka.co.jp/service/news/151026>)

⁸ NREL, Research Cell Efficiency Records, Apr. 2016.

(2) 化合物系

従来、シリコン系に比べて変換効率が低いとされてきた化合物系太陽電池は、近年の研究開発によってその欠点を急速に克服しつつある。原料とする化合物の組み合わせには複数の種類があるが、2015年に日本のソーラーフロンティアは新エネルギー・産業技術総合開発機構 (New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO) との共同研究を通じ、銅、インジウム、セレンなどを用いる CIS 系薄膜太陽電池の世界最高のセル変換効率 22.3%⁹を実現した。また、各種第13族元素と第15族元素からなる III-V 族型太陽電池のうち、3接合型のものではシャープが世界最高となる 37.9% (集光時 44.4%)¹⁰の変換効率を達成している。ただし、こちらはコストが非常に高いため、現状では宇宙用としてのみ実用化されている¹¹。また、毒性が強いカドミウムを用いる CdTe 系は日本では普及していない。

(3) 有機系

有機系太陽電池は新たに研究が進められている種類である。そのなかでも、色素が光を吸収することで発電する色素増感太陽電池の色素部分に、ペロブスカイトと呼ばれる結晶構造を持つ薄膜を使用することで、変換効率が飛躍的に向上しつつある。研究用の面積 0.1cm²程度のセルでは 20%を超える変換効率が報告されているほか、NEDO と物質・材料研究機構 (National Institute for Materials Science, NIMS) の共同研究によって、1cm 角のセルが世界初となる 18.2%¹²の変換効率を記録した。ペロブスカイト導入前の変換効率が最大で約 12%¹³であったことと比較すると、課題の一つとされていた変換効率については大幅に改善されたといえる。有機薄膜太陽電池も近年の技術開発の展開が非常に速く、三菱化学や住友化学が 10%以上¹⁴の変換効率を実現しているほか、その特性を活かして窓に設置する形態での実証実験が行われている¹⁵。

⁹ 2015年12月8日付ソーラーフロンティアプレスリリース (<http://www.solar-frontier.com/jpn/news/2015/C051170.html>)

¹⁰ 2013年6月14日付シャーププレスリリース (<http://www.sharp.co.jp/corporate/news/130614-a.html>)

¹¹ NEDO 『NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版』2014, p.II-11-12.

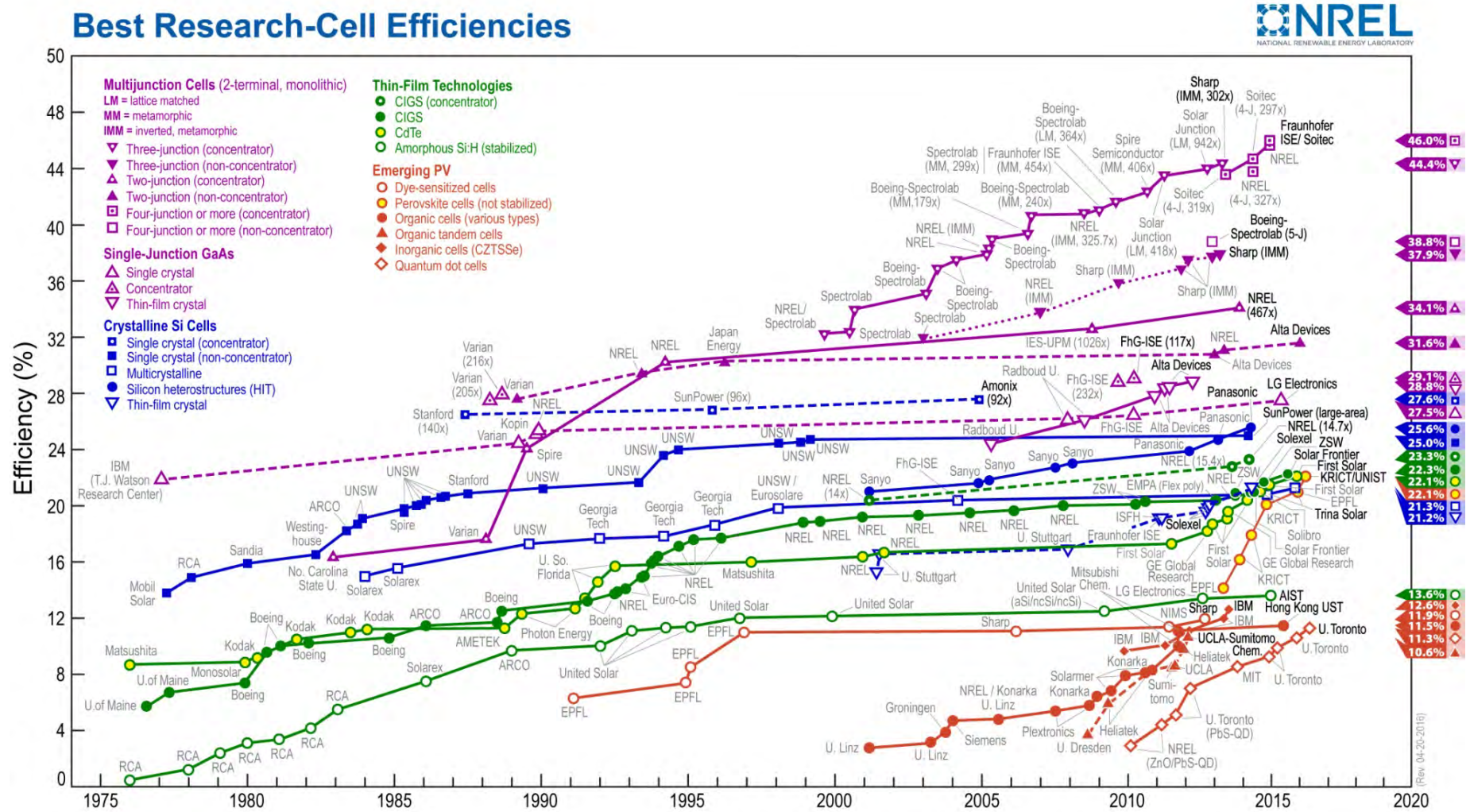
¹² 2016年3月28日付 NEDO プレスリリース (http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100544.html)

¹³ NREL, Research Cell Efficiency Records, Apr. 2016. (<http://www.nrel.gov/ncpv/>)

¹⁴ *Ibid.*

¹⁵ 2015年8月7日付三菱化学プレスリリース (<http://www.m-kagaku.co.jp/newsreleases/00274.html>)

図5 太陽電池（種類別）セル変換効率の推移



出典：NREL, Research Cell Efficiency Records, Apr. 2016.

太陽光発電のコストダウンも、FITの賦課金による電力消費者の負担を軽減する観点から重要視されている。2016年時点での太陽光発電の平均システム価格は約24万円/kW、発電コストは約21.1円/kWh¹⁶となっており、ともに1995年時点の数値¹⁷と比較すると20%以下にまで低下している。しかし、表3の通り、それでも日本の太陽光発電は他国と比べてコストが高止まりしているため、技術開発によってさらにコストダウンを進める必要がある。NEDOはこれまで複数回にわたって太陽光発電の技術開発計画を策定してきたが、2014年に発表された「太陽光発電開発戦略（NEDO PV Challenges）」では太陽光発電のコストについて、図6のように2020年には業務用電力価格並の14円/kWh、2030年には期間電源の発電コスト並の7円/kWhとする目標¹⁸を設定している。

表3 太陽光発電コストの国際比較

	資本費 (ドル/kW)	運転維持費 (ドル/kW/年)	設備利用率	発電コスト (ドル/MWh)
ドイツ	1,000	32	11%	103
フランス	1,050	32	14%	93
スペイン	1,390	36	16%	148
アメリカ	1,427	21	19%	87
オーストラリア	1,445	18	20%	85
インド	898	17	19%	90
中国	1,181	12	16%	102
日本	2,205	68	14%	192

出典：経済産業省，新エネルギー小委員会（第16回）公開資料より作成

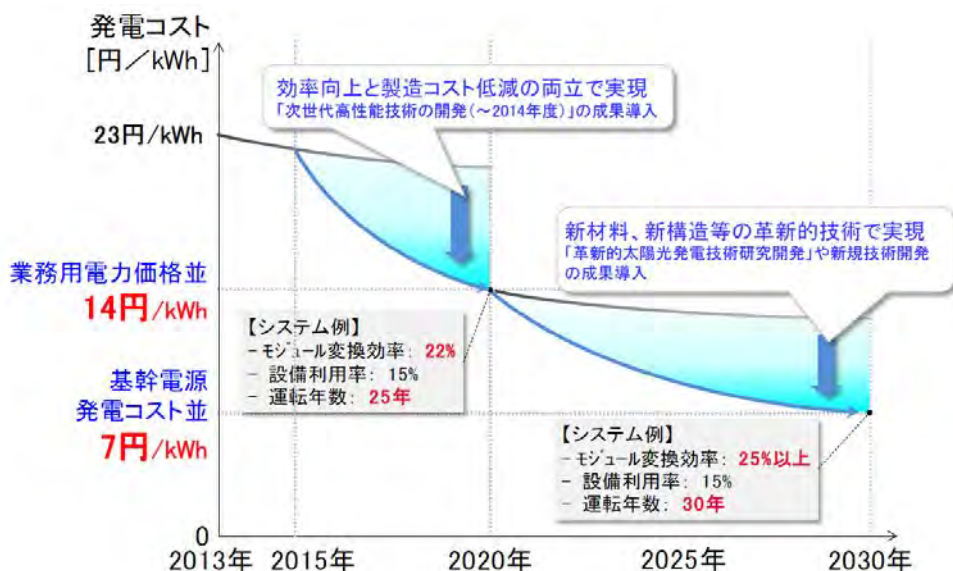


図6 非住宅用システムの発電コスト目標と低減シナリオ

出典：NEDO「太陽光発電開発戦略（NEDO PV Challenges）」2014, p.3.

¹⁶ 経済産業省，新エネルギー小委員会（第16回）公開資料より推計

¹⁷ 経済産業省，ソーラー住宅普及促進懇談会（第1回）公開資料

¹⁸ ただし、この目標値は2004年の「2030年に向けた太陽光発電ロードマップ（PV2030）」や2009年の「太陽光発電ロードマップ（PV2030+）」で既に設定されたものである。

1.3. 主な国内企業

(1) 三菱電機

三菱電機の製品は高出力モジュール（主に単結晶シリコン型を採用）と高効率パワーコンディショナーの組み合わせで、高い発電量を実現している。特にパワーコンディショナーの変換効率は98%を実現しており、住宅用のものでは8年連続で国内第一位を維持している。また、2015年には世界で初めてDCアーク¹⁹が発生した回路を瞬時に特定・遮断し、発電量低下を最小限に抑制するシステムを開発している²⁰。

(2) シャープ

シャープは1959年から太陽電池の開発に着手した歴史あるメーカーであり、住宅用太陽光発電からメガソーラーまで、幅広い実績を有している。累計出荷量は2015年12月末現在で11.6GWに達しており、国内外の様々な場所で採用・評価されている。特に2010年には電気・電子・情報分野における世界最大の学会であるIEEE（Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.）より、1959年から1983年にかけての灯台用・宇宙用から住宅用に至る、太陽電池の商業化と産業化への取り組みが評価され、「IEEE マイルストーン」に認定された。海外進出実績は極めて豊富で、アメリカ、イギリス、ドイツ、イタリア、中国、タイ、モンゴルなどに設備を設置している。特に中国やモンゴルでは砂漠地帯の過酷な環境下でも稼働することを実証した²¹。

(3) パナソニック

前述の通り、パナソニックは結晶シリコン基板とアモルファスシリコン膜を組み合わせたヘテロ接合型太陽電池によって世界最高の変換効率を実現している。この技術は第6回太陽光発電世界会議（WCPEC-6）において、2014年の最も特筆すべき技術として表彰されている。また、これ以外にもIEEEコーポレートイノベーション賞など、多くの国際的な評価を得ている。前述の記録は研究段階の技術によるものであるが、主力製品についても高い変換効率を誇り、単位設備面積あたり、および単位設備容量あたりの発電量で国内メーカー中トップクラスを謳っている。国外ではドイツ、イタリア、フランス、韓国などに納入実績がある²²。

また、2016年の末には、米テスラモーターズとの太陽光パネル事業の提携を発表した。テスラの米工場にパナソニックが約300億円を投じて太陽光パネルの生産ラインを導入し、2017年夏から生産を始める計画である。更には、テスラとパナソニックが共同運営するネバダ州の大規模リチウム電池工場「ギガファクトリー」が2017年1月に生産を開始した。電気自動車のみならず、民生部門や産業部門の定置用途にも供給する。

(4) 京セラ

京セラは、独自の技術による高品質な製品を追及しており、特に長期連続稼働に優れた実績

¹⁹ 直流電流が流れている回路が切り離された際に強い発光を伴って発生する高温の放電（数千℃）

²⁰ 三菱電機ウェブサイトおよびプレスリリース

²¹ シャープ ウェブサイトおよびプレスリリース

²² パナソニック ウェブサイトおよびプレスリリース

を持つ。国内では住宅での長期使用実績が第一位であるほか、2011年にはドイツの第三者認証機関であるテュフ・ラインランドによる長期連続試験²³において、世界で初めて、京セラの多結晶シリコン型太陽電池モジュールが認証を獲得している。また、ドイツのフ라운ホーファー研究機構（Fraunhofer-Gesellschaft）の試験においても、京セラ製品は発電効率が低下しないことが実証されている。海外進出の実績としては、スペインの大規模太陽光発電設備への納入があるほか、1984年以来開発途上国向けの ODA プロジェクトとして太陽電池の供給を担っており、タジキスタン、チュニジア、フィジー、マーシャル諸島共和国など多くの国・地域に累計約 40 件、3,000kW 以上の発電システムを供給している²⁴。

(5) ソーラーフロンティア

ソーラーフロンティアは昭和シェル石油株式会社の 100% 子会社である。結晶シリコン系と比べて高温時の出力ロスが少なく、影による影響も少ない CIS 太陽電池を製造・販売していることが特徴で、これにより同社製品は、理想条件下では測定できない「実発電量」において、全国で高い実績を残している。海外展開も積極的であり、多くの国・地域に納入実績があるが、特にアメリカやヨーロッパの導入実績が多い²⁵。

(6) カネカ

現在、カネカは薄膜シリコン太陽電池を主力としている。これは、従来からカネカが得意としてきた非結晶系シリコン太陽電池と新開発の薄膜多結晶シリコンを組み合わせ、より広い波長の光を効率良く電気に変換することを可能としたもので、同社の化学メーカーとしての競争力を十分に発揮したものである。また、シースルータイプ太陽電池のセル部分製造も担当している²⁶。前述の通り、変換効率についての実績もあり、優れた技術力を有するが、海外進出（納入実績）は報告されていない。

カネカは 1990 年からこの研究開発に取り組み 2001 年に量産化。カネカオリジナルの太陽電池はこうして世に出ることになりました。

1.4. 他国の主な研究開発動向

(1) アメリカ

アメリカでは多数の研究機関や企業が再生可能エネルギーに関する研究を実施しているが、それらのなかでも特に国立再生可能エネルギー研究所（National Renewable Energy Laboratory, NREL）が中心的な位置を占める。

結晶シリコン系の基礎研究については研究人口は多くはないものの、NREL やマサチューセ

²³ 一般的な国際基準である国際電気標準会議（IEC）よりもさらに厳しい条件下で、約 1 年にわたり連続した試験を行う総合的な太陽電池性能品質テスト。

²⁴ 京セラ ウェブサイトおよびプレスリリース

²⁵ ソーラーフロンティア ウェブサイトおよびプレスリリース

²⁶ カネカ ウェブサイト

ッツ工科大学（Massachusetts Institute of Technology, MIT）などにおいて高い水準の研究が実施されている。ペロブスカイト系に関しては多くの大学で研究されており、プリンストン大学、カリフォルニア大学バークレー校などがそれらの先頭に立っている。応用研究では SunPower が裏面接合型の高効率結晶シリコン太陽電池で最高効率を達成しているほか、化合物系太陽電池には多数のベンチャー企業が参入している²⁷。

(2) ヨーロッパ

欧州連合（European Union, EU）では加盟国間共同で様々な分野の研究活動を行うための支援枠組みプログラム（Framework Programme, FP）が設けられている。FP は複数のフェイズに分かれており、2007 年から 2013 年まで²⁸実施された FP7 では太陽光発電を含むエネルギー分野の研究プロジェクト 374 件に対し、累計で約 19 億ユーロの支援が行われた²⁹。現在では 2014 年から 2020 年までを実施期間として Horizon 2020 と呼ばれる新たな枠組みが立ち上げられており、エネルギー分野への支援に累計約 60 億ユーロの³⁰予算が充てられている。2003 年から 2006 年の FP6 では結晶シリコンおよび薄膜シリコン太陽電池への予算が全体の約 5 割を占めていたが、その後結晶シリコン太陽電池に対しては各企業や各国による研究開発投資が増加したことなどから、FP7 では FP6 と比較して予算配分は減少傾向にあることが報告されている³¹。

技術別の変換効率については図 5 に示された通り、ドイツのフラウンホーファー研究機構とフランスの Soitec が集光型太陽電池で世界最高の変換効率を達成したほか、スイスの連邦工科大学ローザンヌ校（École polytechnique fédérale de Lausanne, EPFL）がペロブスカイト太陽電池の変換効率で高い実績を残している。

(3) 中国

中国は太陽電池の産業化では世界トップを走っているものの、これまでの実績を見る限り、基礎研究・応用研究では日米欧よりも遅れているといわざるを得ない。図 5 にも中国企業の名前は多くは見られない。しかし、近年は国家計画の下で、公的研究機関や大学が基礎研究に注力しており、研究水準は上昇傾向にある。有機系太陽電池においては、多くのベンチャー企業が創立されつつある³²。

²⁷ 内閣府，ナノテクノロジー・材料ワーキンググループ（第7回）公開資料

²⁸ FP7 の枠組み自体は既に終了しているものの、その枠組みで補助を受けて実施中のプロジェクトは依然として多数存在する。

²⁹ European Commission, “Ex-Post Evaluation of the Seventh Framework Programme,” 2016, p.11.

³⁰ European Commission, “Horizon 2020 in Brief,” 2014, p.13.

³¹ NEDO (2014), *op. cit.*, p.II-57.

³² 内閣府，ナノテクノロジー・材料ワーキンググループ（第7回）公開資料

2. 地熱発電

2.1. 開発・導入の必要性

(1) エネルギー安全保障

福島事故後、6%程度まで低下した日本のエネルギー自給率の改善は、日本のエネルギー安全保障の根幹である。2015年に発表された「長期エネルギー需給見通し」では、エネルギー自給率を2030年に25%程度まで引き上げることを目標の一つとしている。その達成にあたって、国産エネルギー資源を活用できる再生可能エネルギーは大きな役割を果たし得る。特に地熱発電はエネルギー自給率への貢献のみならず、気候や日照などに発電量が左右されない安定電源であることから、近年急速に導入が進んでいる太陽光の欠点を補う電源としても重要視されている。

(2) 地熱資源の存在

地熱発電の利用可能性は地熱資源の有無によって左右されるが、火山帯に位置する日本には豊富な地熱資源が賦存しており、開発に適した国であるといえる。その資源量は約23.5GWに相当するとされており、これは世界第三位にあたる。しかし、表4の通り日本における地熱発電開発は資源量において下回る国々と比較しても遅れており、その恵まれた資源量を活かしきれていないのが現状である。

表4 国別地熱資源量

	資源量	導入量 (2014年)
アメリカ	30,000	3,525
インドネシア	27,790	1,404
日本	23,470	540
ケニア	10,000	600
フィリピン	6,000	1,915
メキシコ	6,000	813
アイスランド	5,800	665
ニュージーランド	3,650	970
イタリア	3,270	768

出典：NEDO『NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版』2014, p.VII-12,
Bertani, Ruggero, “Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report,”
Proceedings World Geothermal Congress 2015, 2015,
IRENA データベースより作成

(3) 日本企業の競争力

上記の通り、地熱発電は適地が限られているため、事業展開の余地も同時に限られたものとなる。したがって、世界中で導入が進んでいる太陽光や風力発電分野と比較すると、総投資額や雇用創出の規模は小さいといわざるを得ない。しかし、図7から分かるように、この分野では日本企業が世界的に見ても非常に高い競争力を持っており、多くの商機を獲得できる可能性

が高い。

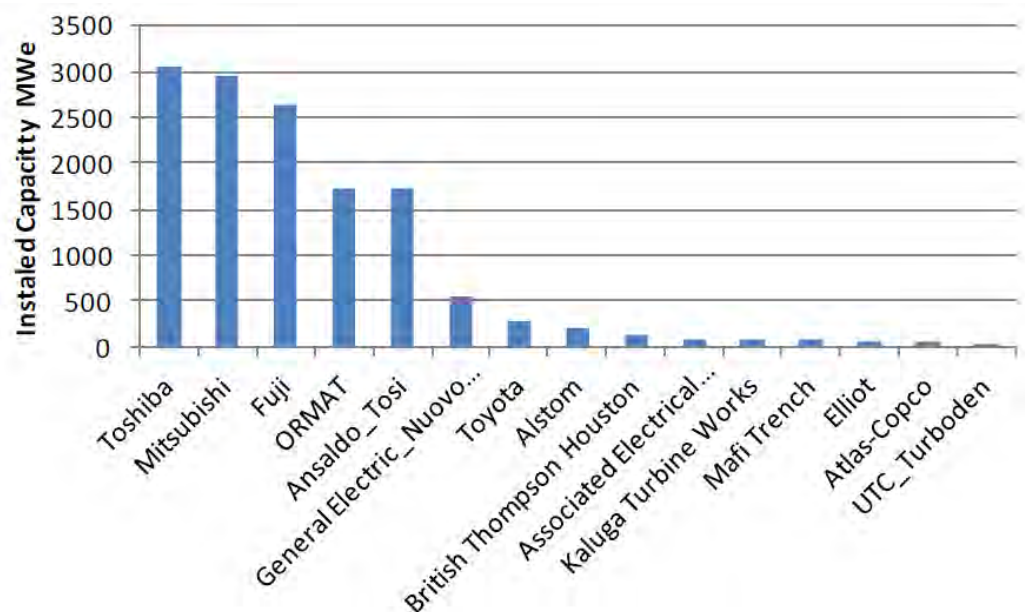


図 7 世界の主な地熱タービン製造業者
出典：Bertani (2015), *op. cit.*, p.16.

(4) 現在の導入量および導入目標

図 8 の通り、日本では 1970 年代後半から地熱発電の導入量が増加してきた。これは 1973 年の石油危機を契機に政府主導での開発が本格化したため、サンシャイン計画やニューサンシャイン計画を通じて、研究開発や新規発電設備の導入が進められてきた。1974 年度には年間 8 億円程度でしかなかった地熱関連予算は図 9 の通り 1980 年代には 150-180 億円にまで増額されている。しかし、1990 年代後半からは減額を続けており、同時に累計設備容量も横這いとなった。2012 年から実施されている固定価格買取制度 (Feed-in Tariff, FIT) も、太陽光発電などには導入量の急増をもたらしたのに対し、地熱発電について現時点では大きな影響を与えてはいない。しかし、2012 年には地下資源開発に知見を有する石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (Japan Oil, Gas and Metals National Corporation, JOGMEC) が政府予算による地熱開発支援を主導する新たな地熱開発体制が構築され、同時に予算も急増したため、今後その成果が発揮されることが期待される。また、累積設備容量では目立った導入量増加が確認できないが、近年では比較的低温な地熱資源を活用できるバイナリー方式を用いた小規模な発電設備が多数導入されている。

2015 年の「長期エネルギー需給見通し」ではエネルギー自給率や温室効果ガス排出量削減の観点から再生可能エネルギー発電を今後の重要なエネルギー源と位置付けており、2030 年度の総発電量の 22-24%にあたる 237-252TWh 程度を再生可能エネルギーによって、うち 1.0-1.1%にあたる 10-11TWh (1.4-1.6GW 相当) 程度を太陽光発電でまかなうとしている。

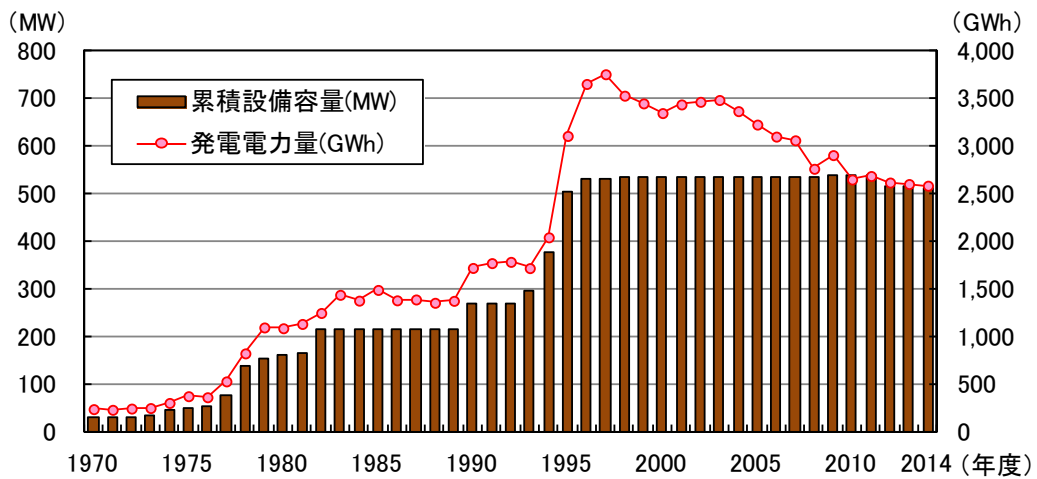


図 8 地熱発電の設備容量および発電量推移

出典：火力原子力発電技術協会『地熱発電の現状と動向 2015年』2016, p.17, 23 より作成

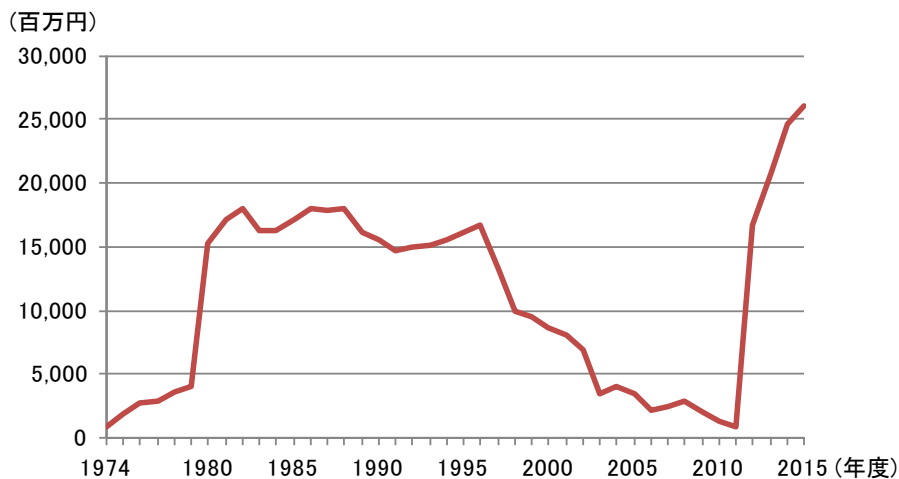


図 9 政府地熱関連予算の推移

出典：Ibid., p.39 より作成

2.2. 国内の技術開発動向

実用化されている地熱発電の技術には大きく分けると「フラッシュ方式」と「バイナリー方式」の2種類が存在する。

フラッシュ方式は地熱貯留層から高温（約 200-350℃）の蒸気と熱水を取り出し、気水分離器で両者を分離した後、その蒸気でタービンを回して発電する方式である。分離した後の熱水を減圧気に通してさらに蒸気（低圧）を取り出し、こちらもタービンの回転に用いる「ダブルフラッシュ方式」も存在する。また、地熱によって乾燥蒸気のみが噴出している場合は気水分離機を通さず、岩片などを除去したうえでタービンの回転に用いることができ、これは「ドライスチーム方式」と呼ばれる。

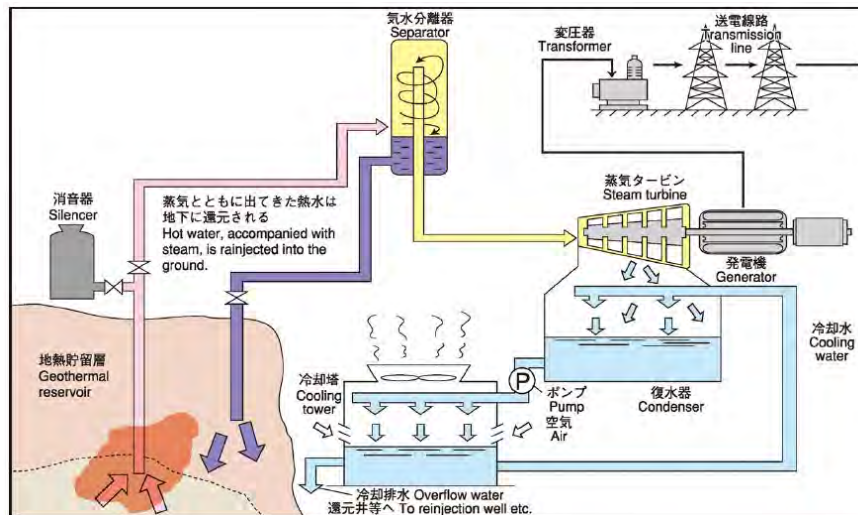


図 10 フラッシュ方式概略図
出典：NEDO (2014), *op. cit.*, p.VII-4.

バイナリー方式は中高温 (80-150℃) の熱水や蒸気を熱源として沸点が低い媒体 (ペンタン、代替フロン、アンモニアなど) を加熱し、これを蒸発させた気体でタービンを回して発電する方式である。これによって、フラッシュ方式では利用できなかった温度帯の地熱資源を利用することが可能になった。特に日本では、低温地熱エネルギーの中でも温泉熱エネルギーが全国各地に分布し、温泉熱を発電に利用することで地域分散型の電源として活用できることから、バイナリー発電の導入拡大が期待されている。

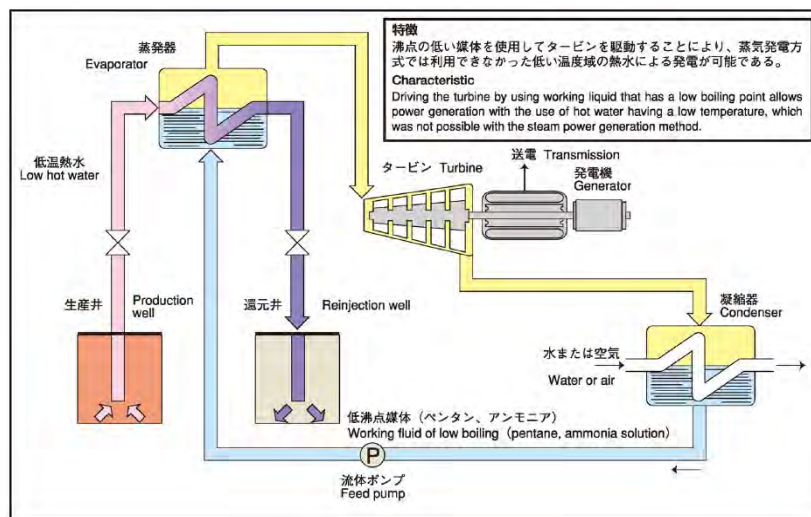


図 11 バイナリー方式概略図
出典：NEDO (2014), *op. cit.*, p.VII-5.

現在の日本における地熱発電に関する技術開発については、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO) が主にバイナリー方式を対象として、以下の目標を掲げて複数年度にわたるプロジェクトを実施している³³：

³³ NEDO 「地熱発電技術研究開発」平成 28 年度実施方針。

①環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発：

地熱発電システムの高効率化に資する技術（熱効率を20%以上に向上させる技術等）を確立する。

②低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発

未利用の温泉熱を利用した低温域のバイナリー発電について、熱効率7%以上に資するシステムを確立するとともに、スケール対策、腐食対策、二次媒体の高性能化に係る技術を確立する。

③発電所の環境保全対策等技術開発

ガス漏洩防止技術や拡散シミュレーション技術、高度利用化に向けた技術（発電能力や利用率の回復・維持・向上のための技術、付加価値増大を実現する技術）等を確立する。

また、上記の発電システムに係る技術とは別に、JOGMECが空中物理探査によって開発重点地域の絞り込みを行っているほか、以下のような技術開発を進めている³⁴：

①地熱貯留層探査技術

石油の探鉱分野でも用いられている弾性波探査や、金属資源開発を主目的に開発した“SQUITEM”による電磁探査の精度向上を目指す。また、これらによって取得したデータの総合的な解析を通じた効率的・経済的な地熱資源探査手法を開発する。

②地熱貯留層評価・管理技術

地熱エネルギー生産の長期安定化を目指し、人工涵養の実証試験を通じて地下における蒸気や熱水の流動状況を把握し、これらの採取量の最適化・安定化を実現する技術を開発する。

③地熱貯留層掘削技術

従来掘削に使用されてきたローラーコーンビットに代わる、多結晶人工ダイヤモンド薄層（Polycrystalline Diamond Compact, PDC）ビットの開発により、地熱調査費用の大部分を占める坑井掘削コストの低減を図る。

³⁴ 西川信康「我が国における地熱発電の現状と JOGMEC の役割」意見交換会資料, 2015.

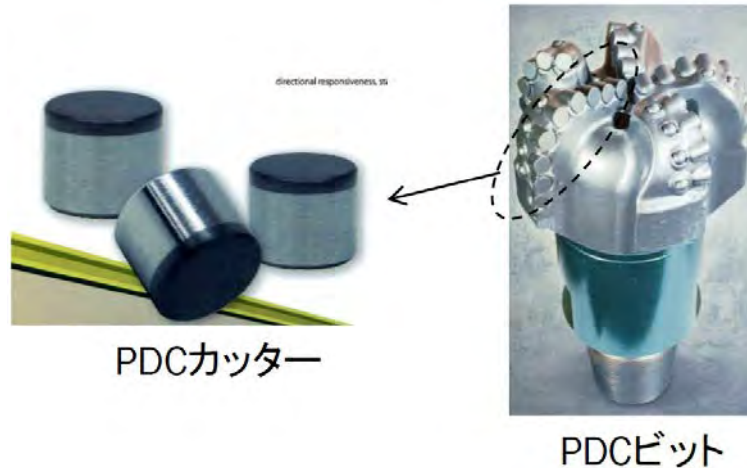


図 12 PDC ビット

出典：西川信康「我が国における地熱発電の現状と JOGMEC の役割」意見交換会資料, 2015.

なお、NEDO における過年度からの研究開発の推移を一覧にしたのが以下の表である。

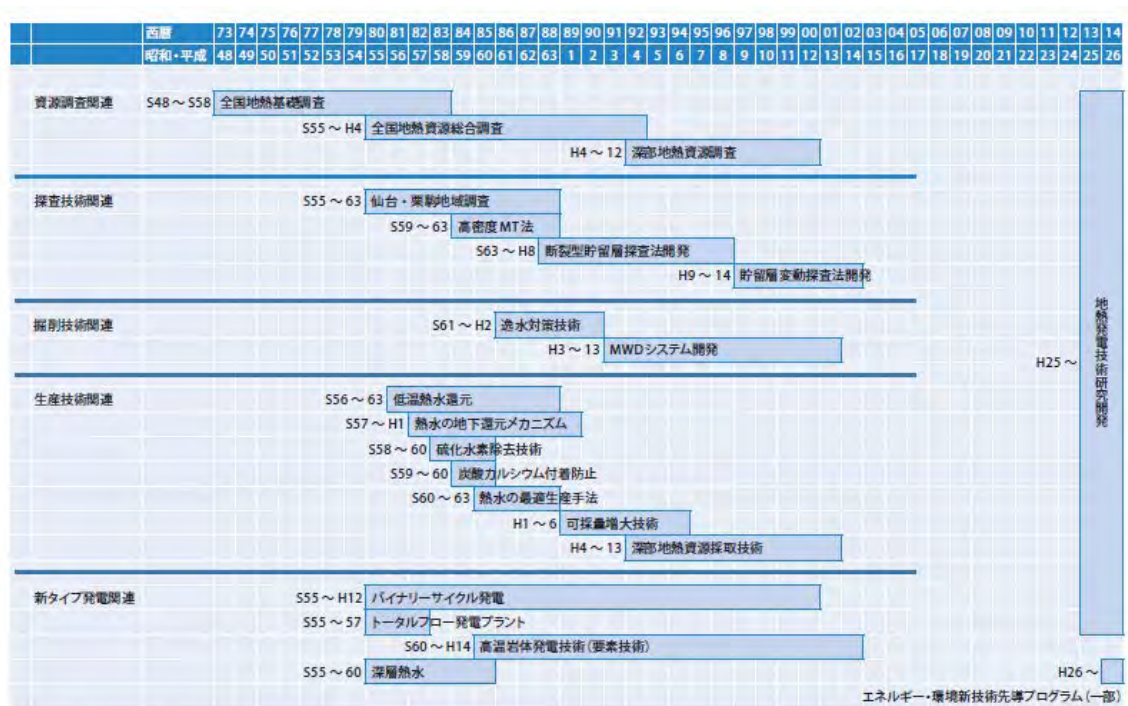


図 6 我が国における主な地熱資源調査及び地熱技術開発関連事業の推移

出所：高温岩体発電システムの技術開発(要素技術の開発)事後評価報告書(NEDO, 2003)を参考に NEDO 技術戦略研究センター作成(2016)

出典：新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「TSC Foresight」vol.12

さらに、2015 年度からは産業技術総合研究所(産総研)が経済産業省からの受託により、涵養地熱系(Enhanced Geothermal System, EGS)³⁵発電や、超臨界地熱資源³⁶による発電に関する

³⁵ これまで行われてきた、天然の熱水を利用する発電とは異なり、高温の岩盤に人工的に亀裂を作り、これに注水することで熱水を得る「高温岩体発電」を発展させたもの。実用化すれば地熱発電の適地は格段に拡大するが、環境影響など不明な部分が多いため実用化には至っていない。

³⁶ 従来利用されてきた地熱資源に比べ、より深い地中(マグマ付近)から抽出する地熱資源。

研究開発を行っている³⁷。

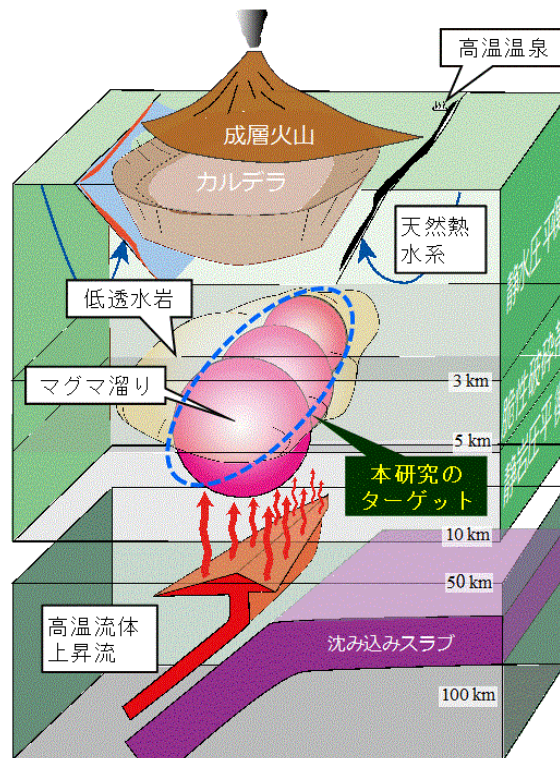


図 13 超臨界地熱システム概略図
出典：産総研ウェブサイト³⁸

高温岩体発電（Hot Dry Rock Geothermal Power Generation, HDR）は、高温の岩盤に人工的に亀裂を作り、これに注水することで熱水を得る方式である。EGS は人工的な水圧刺激を利用して地熱資源を活用するための一連の技術を指し、高温岩体発電も EGS に含まれる。EGS は既存の地熱貯留層の拡大や新規地熱貯留層の創出を目的とする。現在、EGS 技術はまだ成熟しておらず、実証プロジェクトが行われている段階である。

³⁷ 火力原子力発電技術協会『地熱発電の現状と動向 2015年』2016, p.78.

³⁸ <http://www.aist.go.jp/fukushima/ja/unit/GET.html>

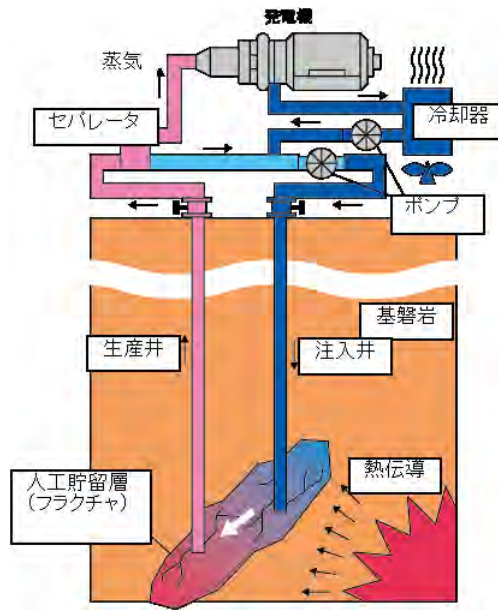


図 14 高温岩体発電の概念図
出典：NEDO 再生可能エネルギー技術白書

(参考) Type 別の EGS

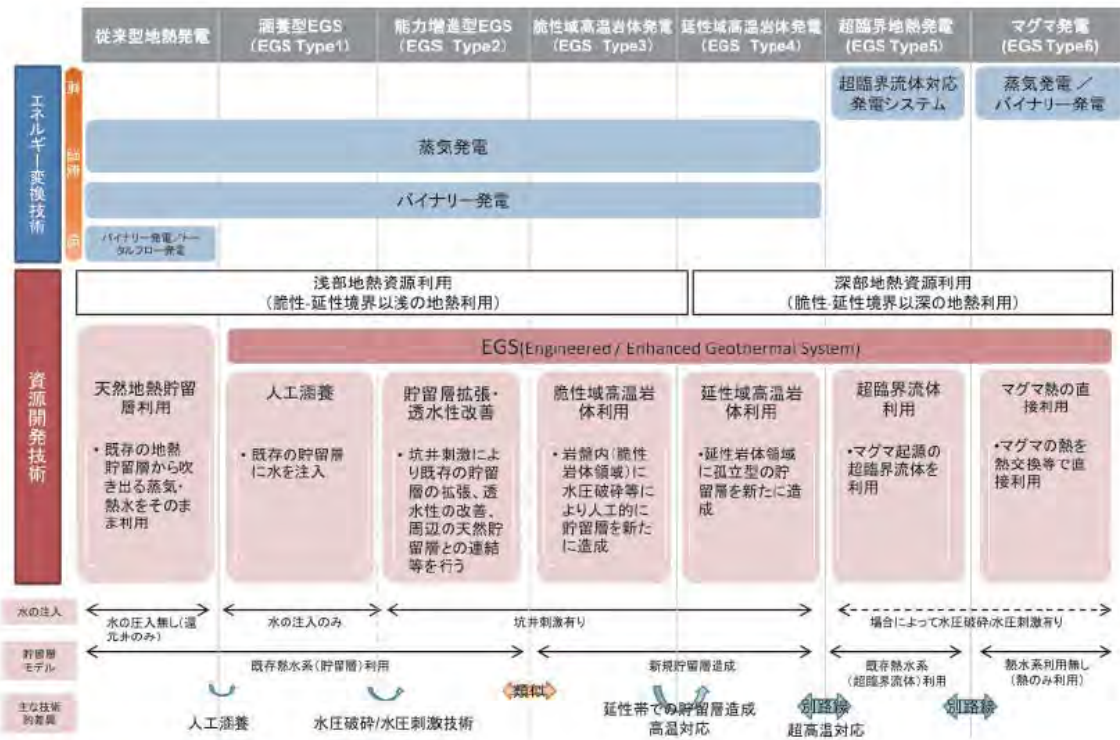


図 16 本紙における各地熱発電技術の区分 (概念図)

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)

出典：新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) 「TSC Foresight」 vol.12

2.3. 主な国内企業

三菱重工、東芝、富士電機、ほか

2.4. 他国の主な研究開発動向

(1) アメリカ

地熱発電導入量で世界第一位のアメリカでは研究開発も盛んに行われており、表 5 の通り、エネルギー省（Department of Energy, DOE）のエネルギー効率・再生可能エネルギー局（Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, EERE）による地熱関連予算も増額傾向にある。特に、最新の技術である EGS に対する予算が例年最大となっていることや、EGS の研究開発を行う地熱エネルギー研究前線観測所（Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy, FORGE）プログラムを地熱分野での旗艦事業と位置付けていることから、その積極性が見て取れる。2017年度のFORGEプログラムの目標には研究開発プロジェクトの募集促進やサイト特性調査の継続のほか、実際の掘削の開始が含まれている³⁹。

表 5 EERE 地熱関連予算

	(千ドル)				
	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度 (要求)
EGS	20,103	27,084	32,100	45,000	45,000
熱水利用	8,092	10,285	12,500	13,800	40,500
低温資源・石油ガス副産物	2,942	4,708	6,000	8,000	10,000
システム分析	3,888	3,698	3,900	3,700	4,000
NREL設備補助	0	0	500	500	0
計	35,025	45,775	55,000	71,000	99,500

出典：DOE 公開資料（各年）より作成

(2) ヨーロッパ

世界初の地熱発電所であるラルデレロ（1913年運転開始、設備容量250kW⁴⁰）を有するイタリアが現在でもヨーロッパ最大の導入量（2014年時点で768MW⁴¹）を保持しているが、ドイツ、フランス、イギリスなどでも新規導入に向けて技術開発に注力しており、図 15 の通りフランスのスルツェス=フォレやドイツのランダウなどに EGS による発電設備が立地している。各国の専門家からなる欧州地熱エネルギー評議会（European Geothermal Energy Council, EGEC）によると、2016年4月の時点で10のEGSプラントが建設中であり、さらに10のサイトで調査が行われている⁴²。

EU では加盟国間共同で様々な分野の研究活動を行うための支援枠組みプログラム（Framework Programme, FP）が設けられている。FP は複数のフェイズに分かれており、現在では2014年から2020年までを実施期間として Horizon 2020 と呼ばれる新たな枠組みが実施中である。Horizon 2020 ではエネルギー分野への支援には累計約60億ユーロ⁴³の予算が充てら

³⁹ DOE, “Geothermal Technologies Office FY 2017 Budget at-a-Glance,” 2016.

⁴⁰ 火力原子力発電技術協会（2016）, *op.cit.*, p.113.

⁴¹ IRENA データベース

⁴² EGEC, “Market Report 2015,” 2016, p.14.

⁴³ European Commission, “Horizon 2020 in Brief,” 2014, p.13.

れているが、多数の研究プロジェクトのうちの一つである「持続可能なエネルギービジネスのための深部 EGS 導入 (DEEPEGS)」プロジェクトにはアイスランド、フランス、ドイツ、イタリア、ノルウェーから合計で 10 の組織が参加し、総予算約四千四百万ユーロのうち約二千万ユーロの支援を受けている。同プロジェクトは 2015 年 12 月 1 日から 2019 年 11 月 30 日まで実施される予定となっている⁴⁴。



図 15 ヨーロッパの EGS 開発サイト

出典：EGEC, “Geothermal Electricity Market in Europe,” 2011.

⁴⁴ Community Research and Development Information Service (CORDIS)
(http://cordis.europa.eu/project/rcn/199917_en.html)

なお、EGS 技術開発に関する各国の取組状況を概括したものが、以下の表となる。

表2 非従来型地熱発電 (EGS) 技術開発に対する各国の取組状況

	酒養型 EGS	能力増進型 EGS	高温岩体発電 (脆性域)	高温岩体発電 (延性域)	超臨界地熱発電	マグマ発電
米国	◎ 実証事業あり e.g. ガイザース (生活排水を注水)	◎ 実証事業あり e.g. デザートヒーク	◎ 実証事業あり e.g. ニューベリー	×	×	×
オーストラリア	×	×	◎ 実証事業あり e.g. クーパーバイズン 及びバララナ	×	×	×
フランス	×	◎ 実証事業あり e.g. ソルツ		×	×	×
ドイツ	×	◎ 実証事業あり e.g. ランダウ		×	×	×
スイス	×	×	◎ 実証事業あり e.g. バーゼル	×	×	×
アイスランド	×	×	×	×	◎* 実証事業あり (IDDP) e.g. クラフラ等	×
韓国	×	×	◎ 実証事業あり e.g. ボハン	×	×	×
日本	◎ 実証事業あり e.g. 柳津西山	○ 民間企業での 取組例あり	○ 実証事業あり e.g. 肘折、碓勝	△ NEDO エネルギー・ 環境新技術先導 プログラム等	△ NEDO エネルギー・ 環境新技術先導 プログラム等	×

◎：実施中、○：過去に実施、△：検討中、×：未実施・未検討

* マグマ付近に存在する超臨界流体を取り出す取組のため、ここでは超臨界地熱発電に分類しているが、本紙で定義した超臨界地熱発電とは水蒸気・熱水の起源が異なる。また、2015年時点では発電には至っておらず、水蒸気を噴出させるところまでに留まる。

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)

出典：新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「TSC Foresight」 vol.12

3. 陸上風力発電

3.1. 開発・導入の必要性

(1) エネルギー安全保障

福島事故後、6%程度まで低下した日本のエネルギー自給率の改善は、日本のエネルギー安全保障の根幹である。2015年に発表された「長期エネルギー需給見通し」では、エネルギー自給率を2030年に25%程度まで引き上げることを目標の一つとしている。その達成にあたって、国産エネルギー資源を活用できる風力発電は不可欠なものとなる。風力発電は自然条件によって発電量が変動する電源であるが、太陽光発電とは異なり夜間も発電可能である。

(2) 市場規模（世界）

水力発電を除いた2014年時点での累積設備容量で見ると、日本では太陽光発電の導入が最も進んでいるが、世界的には図16の通り、陸上風力発電が最も導入が進んでいる。また、年間の新規導入量でも図17の通り、2013年を除いて陸上風力発電が最も多くなっており、開発が盛んに進められていることが分かる。2015年の年間投資額は図18のようになり、風力発電は太陽光発電よりは少なくなっているものの、世界で1,090億ドルの投資を集めている。

以上より、風力発電、とりわけ陸上風力発電は世界の再生可能エネルギー市場において非常に大きな比重を占めているといえる。したがって、日本においてもこの分野での研究開発や実際の導入を進めていくことで、この巨大市場でのシェア獲得に向けた競争力を強化することにつながる。

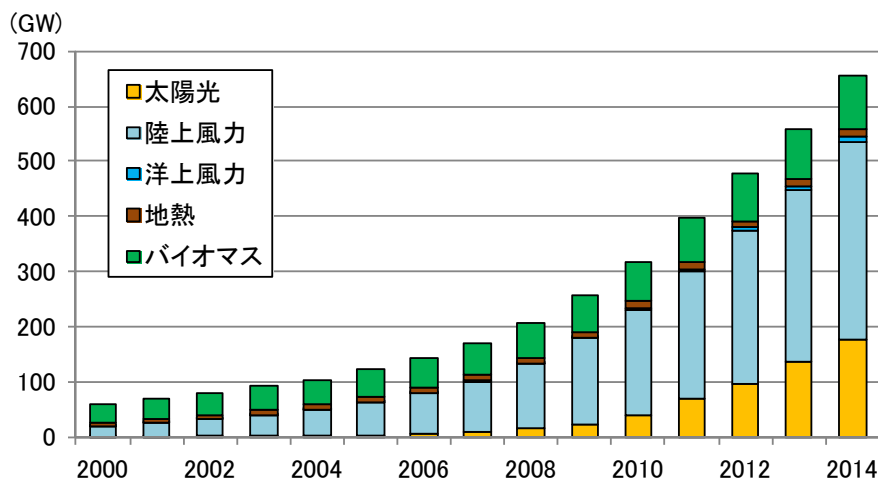


図 16 世界の再生可能エネルギー発電累積設備容量
出典：IRENA データベースより作成

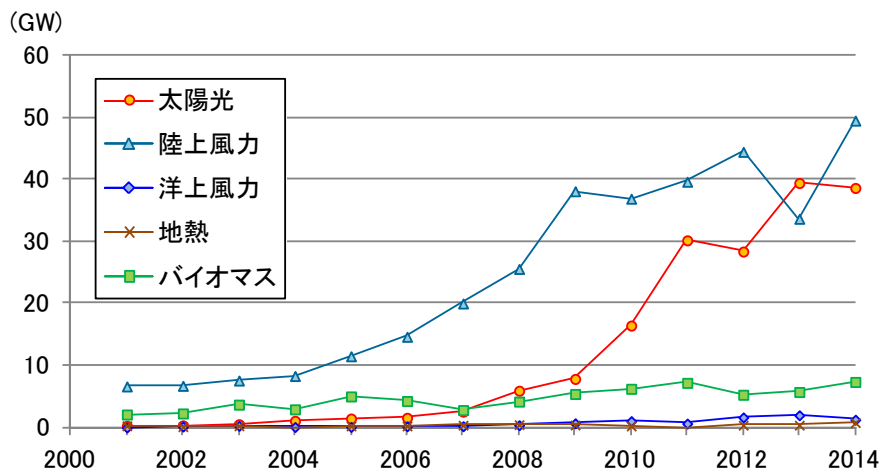


図 17 世界の再生可能エネルギー発電 年間新規導入量
出典：IRENA データベースより作成

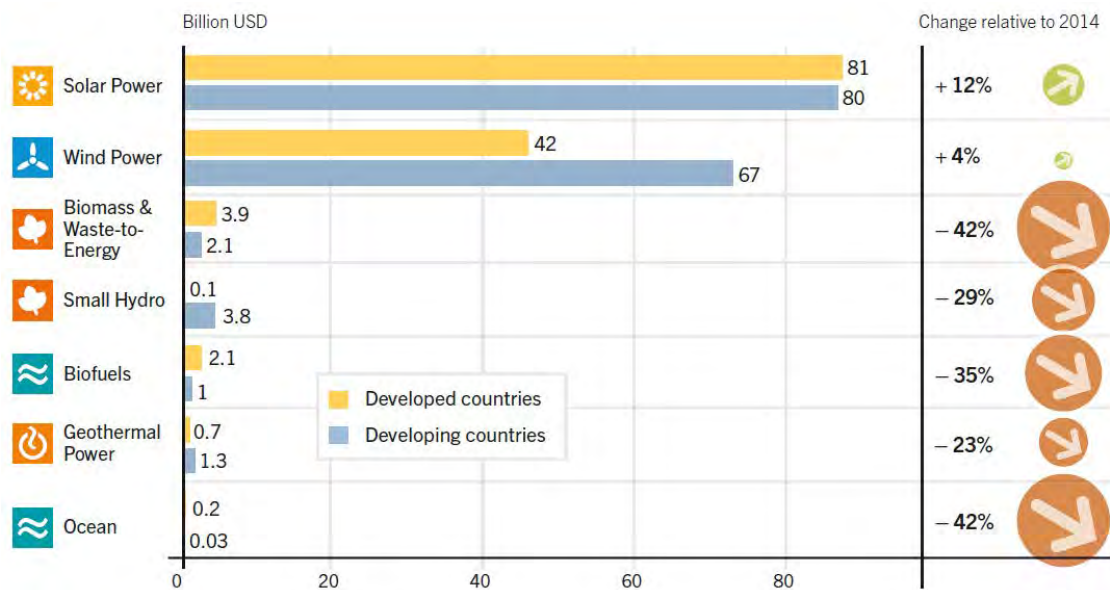


図 18 世界の再生可能エネルギー年間投資額
出典：REN21, “Renewables 2016: Global Status Report,” 2016, p.103.

(3) 発電コスト

一般的にコストが高いとされている再生可能エネルギー発電のなかで、陸上風力発電の発電コストは表 6 の通り比較的安価となっている。ただし、数値上は安価であっても、風力発電は太陽光発電などと比較すると、事業計画の検討開始から実際の発電事業開始までにかかるリードタイムが長く、事業者にとっての負担となっていることには注意しなければならない。また、世界的なコストダウンの傾向に対して、日本の再生可能エネルギー発電にかかるコストは一般的に高止まりしているといわざるを得ず、風力発電もその例外ではないため、さらなるコストダウンの努力が必要である。

表 6 2014年モデルプラント試算結果

電源	原子力	石炭火力	LNG火力	風力(陸上)	地熱	一般水力	小水力 80万円/kW	小水力 100万円/kW	バイオマス (専焼)	バイオマス (混焼)	石油火力	太陽光 (効)	太陽光 (住宅)	ガス コジェネ	石油 コジェネ
設備利用率 稼働年数	70% 40年	70% 40年	70% 40年	20% 20年	83% 40年	45% 40年	60% 40年	60% 40年	87% 40年	70% 40年	30・10% 40年	14% 20年	12% 20年	70% 30年	40% 30年
発電コスト 円/kWh	10.1~ (8.8~)	12.3 (12.2)	13.7 (13.7)	21.6 (15.6)	16.9※ (10.9)	11.0 (10.8)	23.3 (20.4)	27.1 (23.6)	29.7 (28.1)	12.6 (12.2)	30.6 ~43.4 (30.6 ~43.3)	24.2 (21.0)	29.4 (27.3)	13.8 ~15.0 (13.8 ~15.0)	24.0 ~27.9 (24.0 ~27.8)

注：() 内の数値は政策経費を除いた発電コスト

：地熱については、その予算関連政策経費は今後の開発拡大のための予算が大部分であり、他の電源との比較が難しいが、ここでは現在計画中のものを加えた合計 1,430MW で算出した発電量で関連予算を機械的に除した値を記載している。

出典：経済産業省、発電コスト検証ワーキンググループ公開資料、2015。

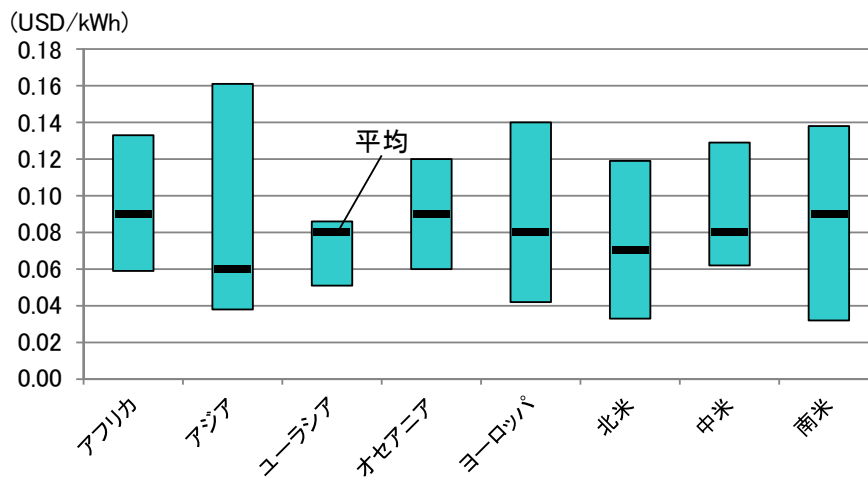


図 19 陸上風力発電の地域別均等化発電原価 (LCOE)

出典：IRENA データベースより作成

(4) 現在の導入量および導入目標

図 20 の通り、日本の陸上風力発電導入量は着実な増加を続けており、2014 年の時点で累積設備容量は約 2.8GW に達している。「長期エネルギー需給見通し」では 2030 年度の総発電量の 22-24%にあたる 237-252TWh 程度を再生可能エネルギーによって、うち 1.7%にあたる 18.2TWh (10GW 相当) 程度を風力発電でまかなうとしている。その風力発電の内訳は、陸上風力が約 16.1TWh (9.18GW 相当)、洋上風力が約 2.2TWh (0.82GW 相当) となっている。しかし、日本風力発電協会 (Japan Wind Power Association, JWPA) は表 8 の通り、この見通しをはるかに上回る導入目標を立てている。

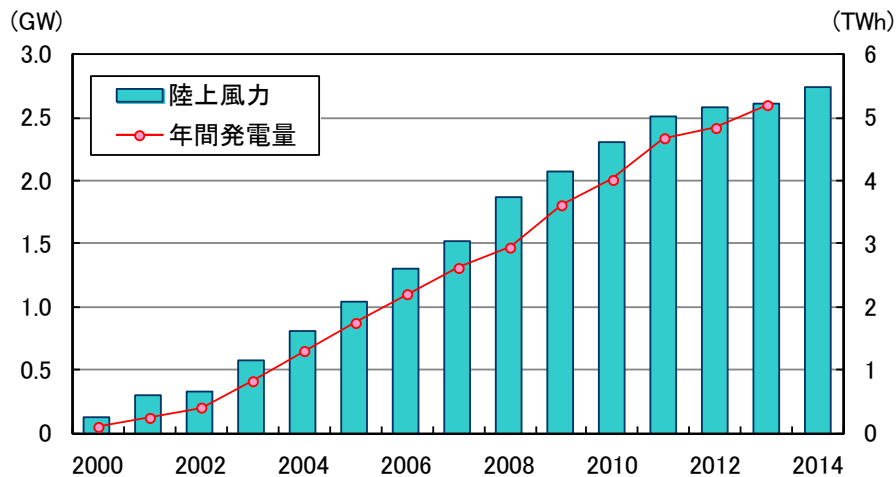


図 20 陸上風力発電の設備容量および発電量推移

注：発電量は洋上風力発電を含む

出典：(設備容量) IRENA データベース

(発電量) IEA, World Energy Statistics and Balances 2015 より作成

表 7 2030 年度における風力発電の導入見込量

	設備容量	発電量
陸上風力	0.82GW	16.1TWh
洋上風力	9.18GW	2.2TWh
合計	10.00GW	18.2TWh

出典：経済産業省「長期エネルギー需給見通し 関連資料」2015 より作成

表 8 風力発電導入ロードマップ (JWPA)

年度	風力発電導入実績と導入目標(GW)				発電量 (TWh)
	合計	陸上	着床	浮体	
2010	2.48	2.45	0.03	0.00	4.3
2020	10.90	10.20	0.60	0.10	23.0
2030	36.20	26.60	5.80	3.80	84.0
2040	65.90	38.00	15.00	12.90	162.0
2050	75.00	38.00	19.00	18.00	188.0

出典：JWPA「風力発電導入ポテンシャルと中長期導入目標 V4.3」2014 より作成

3.2. 国内の技術開発動向

風車の形式には大きく分けて、水平軸 (図 21) と垂直軸 (図 22) の二種類が存在し、それぞれについて研究開発が行われてきたが、現在の大型風車の主流は 3 枚翼の水平軸プロペラ式風車である。風車一基あたりの出力を増大させるためには風車サイズを大きくする必要があるので、これまでの技術開発では大型化が重要課題とされてきた。欧米などと比較して日本での技術開発はやや遅れていたが、2015 年には日立製作所がローター直径 126m (定格出力 5MW) の風力発電システムを完成させている⁴⁵。なお、最初期に製造された風

⁴⁵ 2015 年 3 月 24 日付日立製作所プレスリリース (<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2015/03/0324.html>)

ただし、この風力発電システム (「HTW5.0-126」) は今後の洋上風力分野での展開を企図して開発されたものである。

車の直径は15m（定格出力0.5MW）⁴⁶程度であった。

風車の回転エネルギーを電力に変換するための機構が収納されたナセル部分については、変速システムや発電機の種類によって、図23のように分類される。変速システムには増速機を用いて回転数を上げてから発電機に伝達する増速機方式と、風車の回転をそのまま発電機に伝達するダイレクトドライブ方式（ギアレス）の二種類がある。歯車とベアリングの複雑な相互作用で動く増速機は定期的なメンテナンスを必要とするが、陸上風力の場合はタービンへのアクセスが容易でこの点が問題になりにくいいため、増速機方式が一般的である。一方、発電機には誘導発電機と同期発電機の二種類が存在するが、増速機方式の設備には誘導発電機が採用されている。そして、誘導発電機は回転子の形状や系統連系方式の違いによって、かご型誘導発電機、巻線型誘導発電機、二次巻線型誘導発電機などに分類される。以前はかご型誘導発電機および巻線型誘導発電機が発電機の主流であったが、大型化が進むにつれ、出力変動抑制などへの対応から二次巻線型誘導発電機が主流になりつつある。

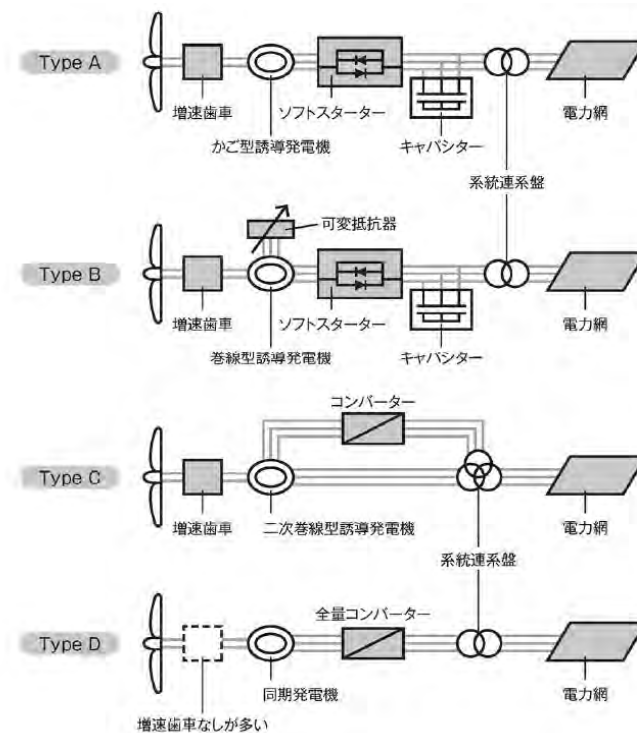


図 21 3枚翼水平軸風車
出典：三菱重工業ウェブサイト



図 22 多翼式垂直軸風車
出典：三菱重工業ウェブサイト

⁴⁶ EWEA, Wind Energy Factsheets, 2010.



Type	変速システム	発電機	長所	短所
A	低速 増速機方式	かご型誘導発電機	安価、構造がシンプル、頑丈	フリッカ電圧、電力調整不可、抵抗率
B	可変速 増速機方式	巻線型誘導発電機	最適な出力調整可	コンバータサイズ、高価
C	可変速 増速機方式	二次巻線型誘導発電機	最適な出力調整可、コンバータがコンパクト	速度範囲の制限、高価
D	可変速 ダイレクトドライブ方式（ギアレス）が多い	同期発電機	電圧および出力調整可、ギアレス、高効率、頑丈、自己励磁	全量コンバータが必要、発電機構成が複雑、非常に高価

図 23 代表的な発電方式

出典：NEDO『NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版』2014, p.III-50.

近年では風況の良い場所での開発が進み、適地が少なくなっていることから、技術開発の取り組みは洋上風力発電に注力するようになってきているが、より低い風速でも発電できる陸上設備の開発も行われているほか、風況予測の高精度化や系統連系・制御システム開発などの周辺技術にも重点が置かれるようになってきている。

現在日本で進行している主要な技術開発プロジェクトとしては、2013年度よりNEDOが主導して実施している「風力発電高度実用化研究開発」があげられる。本プロジェクトは大きく分けて三つの目標を設定しており、①10MW 超級風車の実現可能性調査（2014年度まで）、②スマートメンテナンス技術確立および設備利用率23%以上の達成（2017年度まで）、③風車部品高度実用化開発のプロトタイプ機におけるフィールド試験を完了し、風車の総合効率を20%以上向上するほか、小型風車の要素部品の使用を決定し、コストを30%以上削減する（2016年度まで）、となっている。

3.3. 主な国内企業

(1) 三菱重工業

三菱重工は1980年から風車の製造を開始している。1MW級大型風車の開発と量産、風車の国際設計認証の取得、永久磁石式同期風車の商用化は、日本企業としてはいずれも三菱重工が達成したものである。近年の風力発電分野での活動は、MHI ヴェスタスとしての洋上風力発電設備の設計・製造が中心となっているが、陸上風力でも世界中で納入実績がある。2010年9月末の時点で納入数は3,789基、累積設備容量は3,484MWとされており、特にアメリカが主要な進出先となっている⁴⁷。

(2) 日立製作所

前述の通り、日立製作所は定格出力5MWの風力発電設備を完成させているが、それ以外の製品ラインナップは2MWクラスを中心としている。また、2015年には三菱重工から2.5MWの発電システムのライセンスを取得し、国内陸上風力発電所向けの製造・販売・保守を実施できるようになった。日立製品に共通する特徴としては、ローターをナセルの風下側に配置する独自のダウンウィンド型を採用していることがあげられる。これにより、①山岳地の吹上風を効率良く捉えることができる、②風向風速計がローター前方にあるため、より正確な状態監視ができ、効率的な制御が可能となる、③本体に掛かる負荷を軽減でき、耐久性の向上も期待できる、④暴風待機時に停電した場合でも自然に風を受け流せる、といった利点がある。また、ダウンウィンド型は洋上での設置にも適していると考えられている。日立の風力発電システムは国内では200基以上の受注実績があり、トップクラスである⁴⁸が、海外展開の実績は確認できない。

(3) 東芝

東芝は2011年に韓国のUNISON社と業務提携し、風力発電事業に参入した。自社の販売網を活用したUNISON社製風力発電機の販売と、この風力発電機を用いた発電所建設を手がけているほか、これまで火力や水力発電で培った技術を活用して電機品を中心とした機器開発を進めている。製品ラインナップには750kW機と2MW機があるが、共通して発電機に密閉型の永久磁石励磁同期発電機を採用している。これにより、外部励磁用スリップリングをなくし、メンテナンスフリー・故障率低減が図られているほか、励磁電源が不要となるため、発電効率が向上している。ブレードには長翼を採用し、比較的低い風速でも発電を可能としている⁴⁹。国内では多数の受注・納入実績があるが、海外展開の実績は確認できない。

(4) 日本製鋼所

兵器メーカーとして1907年に設立された歴史の長い企業であるが、風力発電システム事業への参入は2000年⁵⁰と比較的新しい。発電機に永久磁石を使用しているほか、ギアレスであ

⁴⁷ 三菱重工業ウェブサイト

⁴⁸ 日立製作所ウェブサイト

⁴⁹ 東芝ウェブサイト

⁵⁰ The Japan Steel Works, Annual Report 2015.

る点に特長を持ち、高い発電効率と信頼性を実現している。増速機や主軸が不要であることから保守が容易となり、保守コストの大幅な低減を可能とした。また、AC-DC-ACフルコンバータを採用しており、電力系統への影響を小さくしているため、離島など電力系統が弱い地域への導入にも適している⁵¹。海外に多数の製造拠点はあるものの、風力発電分野での海外展開の実績は確認できない。

3.4. 他国の主な研究開発動向

(1) アメリカ

アメリカではエネルギー省（Department of Energy, DOE）が中心となり、多数の企業や研究機関とともに研究開発を進めている。2015年度には風力発電のみで1億700万ドルの予算が執行されている。その活動の中心はやはり洋上風力であるが、陸上風力についても国立再生可能エネルギー研究所（National Renewable Energy Laboratory, NREL）の試験用施設（コロラド州）や、クレムゾン大学（サウスカロライナ州）、テキサス工科大学（テキサス州）などで風車の大型化を中心とした技術開発を行っている⁵²。

DOEは2015年に“Wind Vision”と題した報告書を公表しており、このなかで2050年に全米の電力消費量の35%を風力発電でまかなうという目標の達成に向けた施策についてまとめている。それらのうち技術開発に関するものとしては、①陸上風力の均等化発電原価（Levelized Cost of Electricity, LCOE）を2020年までに24%、2030年までに33%、2050年までに37%削減する、②遠隔地域、低風速地域、洋上、環境面の配慮を要する地域での導入障壁を引き下げ、開発可能地域を拡大する⁵³、といったものがあげられる。ただし、これらは技術開発のみによってではなく、風力資源探査、サプライチェーン整備、人材育成、アウトリーチ活動、制度設計などと合わせた複合的手法によって達成するとしている。

(2) ヨーロッパ

ヨーロッパにはデンマークのVestas、ドイツのEnercon、スペインのGamesaといった、風力発電設備製造の大手企業があり、世界市場の中で高い競争力を持っている。欧州連合（European Union, EU）では加盟国間共同で様々な分野の研究活動を行うための支援枠組みプログラム（Framework Programme, FP）が設けられている。FPは複数のフェイズに分かれており、風車設計に係る基礎研究はFP1（1984-1988年）から開始されている。また、風車の導入適地の選定に重要となる風況観測や風況予測技術の開発、風況マップの整備などについても、早期から研究されてきた。

2007年から2013年まで⁵⁴実施されたFP7の後、2014年から2020年までを実施期間としてHorizon 2020と呼ばれる新たな枠組みが立ち上げられている。Horizon 2020では風力発電を含めたエネルギー分野での研究開発支援として、7年間で累計約60億ユーロの⁵⁵予算が充てられ

⁵¹ 日本製鋼所ウェブサイト

⁵² IEA Wind, “Annual Report for 2014,” 2015, p.188.

⁵³ DOE, “Wind Vision: A New Era for Wind Power in the United States,” 2015, p.250.

⁵⁴ FP7の枠組み自体は既に終了しているものの、その枠組みで補助を受けて実施中のプロジェクトは依然として多数存在する。

⁵⁵ European Commission, “Horizon 2020 in Brief,” 2014, p.13.

ている。ヨーロッパでも多くの研究プロジェクトが洋上風力発電の開発に重点を置いているが、風車の素材や表面構造の最適化によって、発電設備の大型化や効率向上を目指すなど、陸上風力を射程に入れたプロジェクトもある。

変動電源である風力発電の導入にあたっては系統制御技術の確立も重要になる。この点についてはスペインの再生可能エネルギーコントロールセンター（Centro de Control de Energías Rnovables, CECRE）が用いるリアルタイムでの制御・監視システム（Generación Eólica Máxima Admisible en el Sistema, GEMAS）が注目されている。本制御システムによって、スペインの全発電設備の年間発電電力量に占める風力の割合は2008年3月に40%⁵⁶超を記録している。

(3) 中国

2014年に中国政府が発表した科学技術全般の研究開発計画のうち、陸上風力発電に関するものとしては、風車設計の最適化、遠隔地における大型発電設備の統合的運用、定格出力7MW級の大型風車の設計、などがあげられている⁵⁷。主な研究機関としては中国風力エネルギー協会（Chinese Wind Energy Association, CWEA）があり、IEA Windの国際研究枠組みに参加している。

中国は2014年の時点で陸上風力発電の設備容量が約114GWで世界第一位となっており、約38GW⁵⁸で第二位のドイツを大きく引き離している。しかし、系統上の問題から稼働できていない設備が多いことから年間発電量（2013年）は約139TWhとなっており、約170TWhのアメリカに次いで世界第二位となっている。

⁵⁶ NEDO『NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版』2014, p.III-51.

⁵⁷ IEA Wind (2015), *op. cit.*, p.91.

⁵⁸ IRENA データベース

4. 洋上風力発電

4.1. 開発・導入の必要性

(1) エネルギー安全保障

福島事故後、6%程度まで低下した日本のエネルギー自給率の改善は、日本のエネルギー安全保障の根幹である。2015年に発表された「長期エネルギー需給見通し」では、エネルギー自給率を2030年に25%程度まで引き上げることを目標の一つとしている。その達成にあたって、国産エネルギー資源を活用できる風力発電は不可欠なものとなる。風力発電は自然条件によって発電量が変動する電源であるが、太陽光発電とは異なり夜間も発電可能である。

(2) 土地制約の解消

陸上での風力発電開発が進むにつれて、風況や地形といった面での適地は減少していくことになる。特に日本は開発の容易な平地が少ないうえ、環境基準によって住民の生活に悪影響を与えないことが求められる、すなわち居住地から一定以上の距離を空ける必要があるため、陸上での開発適地は決して多くはない。洋上での風力発電開発が可能となれば、この問題は大幅に改善される。また、道路の道幅などの制約もなくなるため、発電効率の良い大型風車の建設サイトへの輸送も比較的容易であると考えられる。ただし、その場合は陸上からのアクセシビリティや海流の状況といった立地条件、海中環境への影響、そして設備の維持管理や送電などにかかるコストの増大など、別の問題が発生し得ることには注意しなければならない。

(3) 風況

洋上は陸上とは異なり遮蔽物が存在しないため、一般的に風速が速く、また風況も安定している。これは日本においても例外ではなく、図 24 および図 25 の通り、開発にかかる技術的・制度的制約を考慮しない、単純な風力資源賦存量は洋上の方が豊富である。日本はヨーロッパなどと比べると風況が良くないが、北海道の洋上には適地が広がっているといえる。

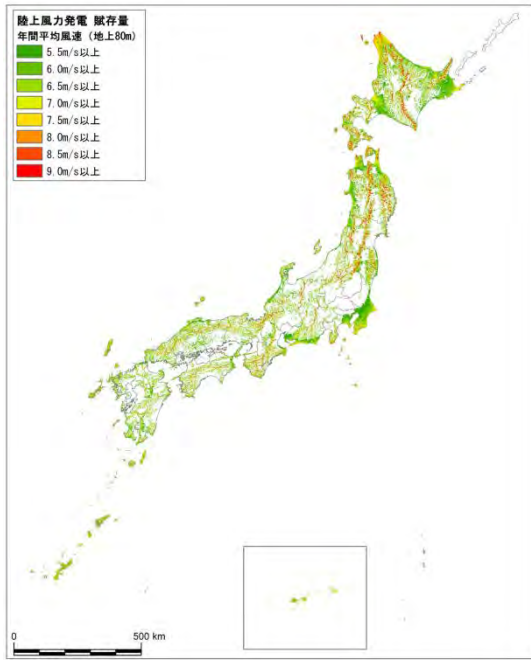


図 24 風力資源分布図（陸上）⁵⁹

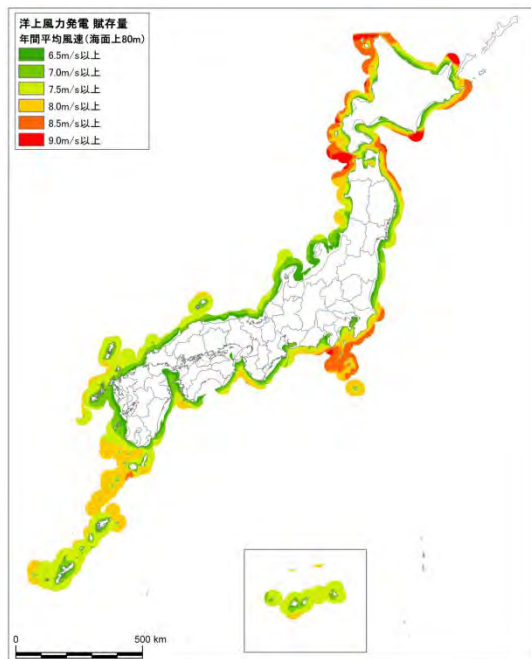


図 25 風力資源分布図（洋上）

出典：伊藤忠テクノソリューションズ「風力エネルギーの導入可能量に関する調査」経済産業省，平成22年度新エネルギー等導入促進基礎調査事業，2011，p.11-12.

(4) 現在の導入量および導入目標

ごく限られた国でしか実際の導入が進んでいないなか、日本の洋上風力発電の累積設備容量は2014年の時点で約50MW⁶⁰となっている。とはいえ、この数字は積極的に導入を進めているイギリス(4,501MW)、デンマーク(1,271MW)、ドイツ(1,012MW)に比べるとはるかに小さい。「長期エネルギー需給見通し」では2030年度の総発電量の22-24%にあたる237-252TWh程度を再生可能エネルギーによって、うち1.7%にあたる18.2TWh(10GW相当)程度を風力発電でまかなうとしている。その風力発電の内訳は、陸上風力が約16.1TWh(9.18GW相当)、洋上風力が約2.2TWh(0.82GW相当)となっている。しかし、日本風力発電協会(Japan Wind Power Association, JWPA)は表10の通り、この見通しをはるかに上回る導入目標を立てている。

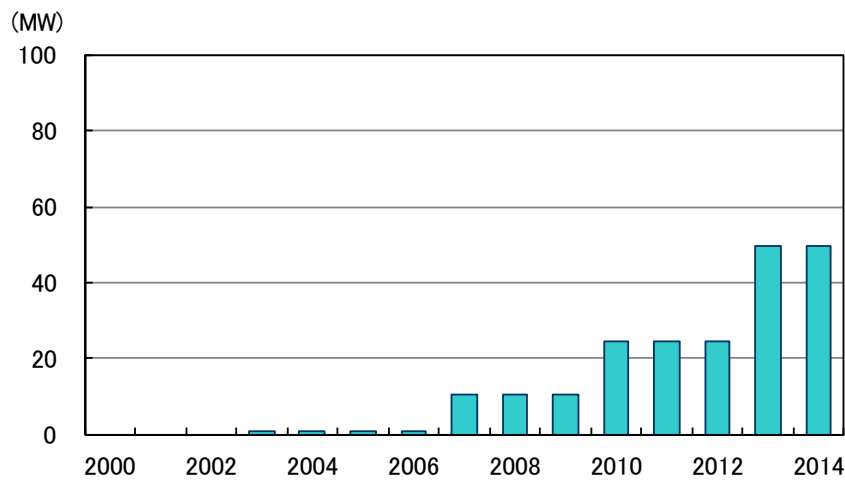


図 26 洋上風力発電の設備容量推移
出典：IRENA データベースより作成

表 9 2030 年度における風力発電の導入見込量

	設備容量	発電量
陸上風力	0.82GW	16.1TWh
洋上風力	9.18GW	2.2TWh
合計	10.00GW	18.2TWh

出典：経済産業省「長期エネルギー需給見通し 関連資料」2015より作成

表 10 風力発電導入ロードマップ (JWPA)

年度	風力発電導入実績と導入目標(GW)				発電量 (TWh)
	合計	陸上	着床	浮体	
2010	2.48	2.45	0.03	0.00	4.3
2020	10.90	10.20	0.60	0.10	23.0
2030	36.20	26.60	5.80	3.80	84.0
2040	65.90	38.00	15.00	12.90	162.0
2050	75.00	38.00	19.00	18.00	188.0

出典：JWPA「風力発電導入ポテンシャルと中長期導入目標 V4.3」2014より作成

⁶⁰ IRENA データベースより

4.2. 国内の技術開発動向

洋上風力発電には、海底に直接基礎を設置する着床式と、浮体を基礎としてワイヤーなどで固定する浮体式に分類される。また、着床式・浮体式ともに、図 28 および図 29 のように海中の支持構造が複数種類存在する。浮体式は水深の深い海域でも導入可能であり、特に日本の海底地形に適していると期待されているが、未だ実証試験の段階であり、ごく一部を除いて実用には至っていない。2016年4月には五島フローティングウィンドパワー（戸田建設の100%子会社）が国内初で初めて、浮体式洋上風力発電設備（日立製作所製、2MW級）の実用化を達成した。これは2010-2015年度にわたって長崎県五島市杵島沖にて実証事業を実施していた設備が、安全性と環境影響の少なさが確認されたため、翌年度から同市の崎山漁港沖合に場所を移し、実用設備として運転を継続しているものである。なお、同設備の支持構造（浮体構造）には上部に鋼、下部にコンクリートを使用する「ハイブリッドスパー型」と呼ばれる形式を採用し、コストダウンと安定性向上を両立させている⁶¹。

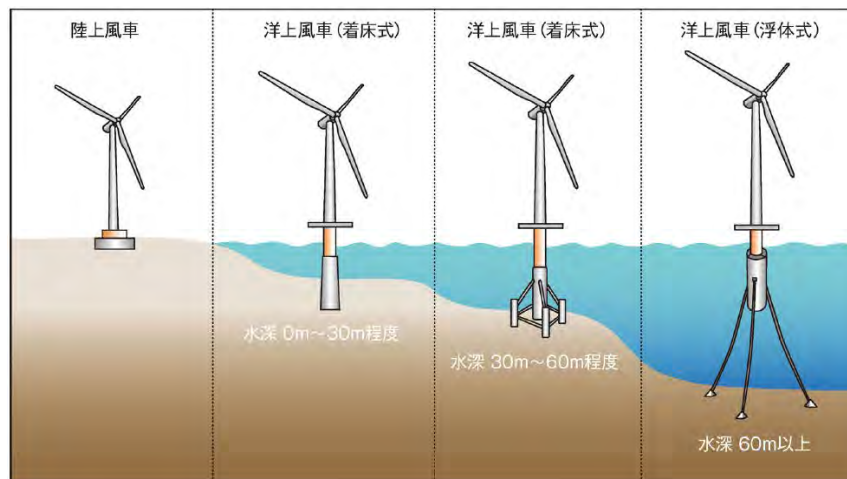
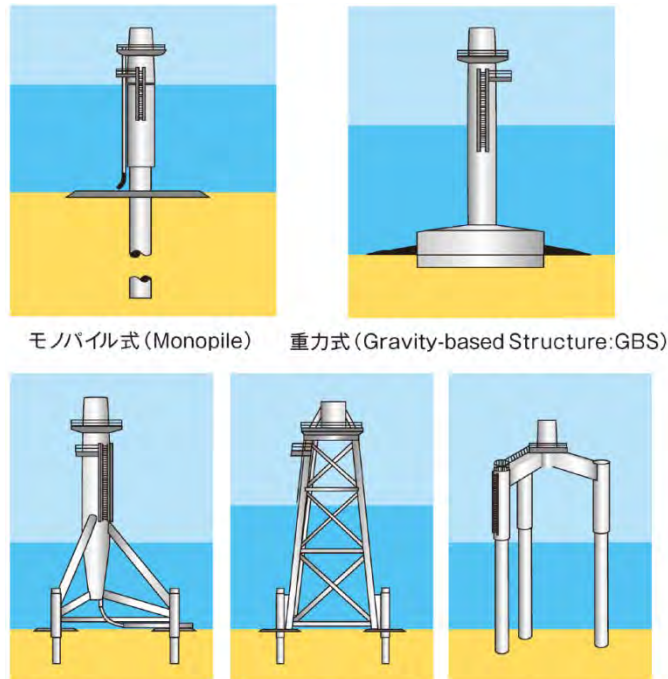


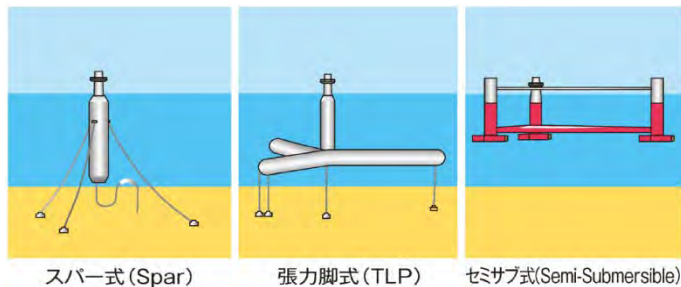
図 27 風力発電の形態と水深の関係

出典：NEDO『NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版』2014, p.III-72.

⁶¹ 2016年4月15日付戸田建設プレスリリース（<http://www.toda.co.jp/news/2016/20160415.html>）



モノパイル式 (Monopile) 重力式 (Gravity-based Structure:GBS)
 トライポッド式 (Tripod) ジャケット式 (Jacket) トリパイル式 (Tri-pile)
 図 28 着床式洋上風力発電の一般的な支持構造
 出典：NEDO (2014), p.III-73.

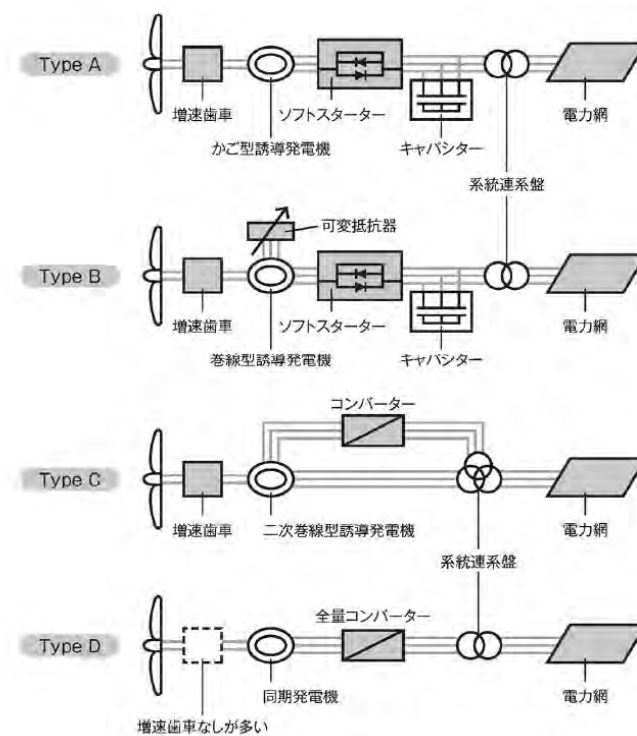


スパー式 (Spar) 張力脚式 (TLP) セミサブ式 (Semi-Submersible)
 図 29 浮体式洋上風力発電の支持構造
 出典：NEDO (2014), p.III-74.

発電システムの構成については、変速システムや発電機の種類によって、図 30 のように分類される。変速システムには増速機を用いて回転数を上げてから発電機に伝達する増速機方式と、風車の回転をそのまま発電機に伝達するダイレクトドライブ方式（ギアレス）の二種類があるが、歯車とベアリングの複雑な相互作用で動く増速機は定期的なメンテナンスを必要とし、洋上風力の場合はタービンへのアクセスが困難であるため、ダイレクトドライブ方式が一般的になりつつある。一方、発電機には誘導発電機と同期発電機の二種類が存在するが、ダイレクトドライブ方式の設備には同期発電機が採用されている。同期発電機については近年、永久磁石を用いた型の発電機の技術開発が推進されている。これにより、発電時に回転子に駆動電力を供給する必要がなくなることに加え、発電機の径こそ大きくなるものの、重量の大幅な低減、ナセルの小型化が可能とされている。また、高効率化と軽量化を目的とした超電導技術の開発も行われている。

日本の洋上風力発電技術開発については、主に新エネルギー・産業技術総合開発機構（New

Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO) の主導によって 1990 年代後半から関連する調査や研究が開始された。これまでには「日本における洋上風力発電の導入可能性調査」(1998 年)、「離島地域等における洋上風力発電システム技術開発課題および今後の方向性に関する調査」(2000 年)、「洋上風力発電導入のための技術的課題に関する調査」(2006 年)などが実施されており、現在では「洋上風力発電等技術研究開発」が実施されている。同事業では、①日本の海象・気象条件に適した洋上風況観測システムおよび洋上風力発電システム技術の確立(2016年度まで)、②実証研究や要素技術開発を通じ、水深 50-100m の海域を対象とした、低コストを実現する浮体式洋上風力発電システム技術の確立(2017年度まで)、を目標としている。



Type	変速システム	発電機	長所	短所
A	低速 増速機方式	かご型誘導発電機	安価、構造がシンプル、頑丈	フリッカ電圧、電力調整不可、抵抗率
B	可変速 増速機方式	巻線型誘導発電機	最適な出力調整可	コンバータサイズ、高価
C	可変速 増速機方式	二次巻線型誘導発電機	最適な出力調整可、コンバータがコンパクト	速度範囲の制限、高価
D	可変速 ダイレクトドライブ方式(ギアレス)が多い	同期発電機	電圧および出力調整可、ギアレス、高効率、頑丈、自己励磁	全量コンバータが必要、発電機構成が複雑、非常に高価

図 30 代表的な発電方式
出典：NEDO (2014), p.III-50.

4.3. 主な国内企業

(1) 三菱重工業

三菱重工はデンマークのヴェスタス社との合弁で、2014年に洋上風力発電設備専門の MHI

ヴェスタスを設立した。これにより三菱重工は、この分野では他の日本企業に先んじて事業実績と海外展開を重ねているといえる。MHI ヴェスタスでは定格出力3MW級のシステムのほか、世界最大規模となる8.0MWのシステム（「V164-8.0」）を製品ラインナップに加えている。既にV164-8.0はイギリスおよびデンマークでのプロジェクトから多数の注文を受けており、2016年の時点で受注実績は126基、1,036MWに達しており、これらは2017年以降から運転を開始する予定とされている⁶²。また、三菱重工単体でもNEDOによる千葉県銚子沖での着床式発電設備実証事業（2.4MW）や、福島洋上風力コンソーシアムによる浮体式ウィンドファーム実証事業の設備製造を行っている。また、海外向けに7MW洋上風車の開発も進めている⁶³。福島における浮体式洋上ウィンドファームに使用される設備の概要は表11の通りとなっている。

表11 福島復興・浮体式洋上ウィンドファーム設備概要

設備名称	設備規模	風車形式	浮体形式	工期
浮体式洋上サブステーション 「ふくしま絆」	容量25MVA 電圧66kV	変電所 (日立製作所製)	アドバンストスパー (ジャパンマリニュナイツド製)	第1期
ダウンウィンド型風車搭載用セミサブ 「ふくしま未来」	2MW	ダウンウィンド型 (日立製作所製)	4コラム型セミサブ (三井造船製)	第1期
7MW風車搭載用セミサブ 「ふくしま新風」	7MW	油圧式ドライブ型 (三菱重工業製)	3コラム型セミサブ (三菱重工業製)	第2期
5MW風車搭載用アドバンストスパー 「ふくしま浜風」	5MW	ダウンウィンド型 (日立製作所製)	アドバンストスパー (ジャパンマリニュナイツド製)	第2期

出典：三菱重工業ウェブサイトより作成

(2) 日立製作所

日立製作所は三菱重工と同様、福島洋上風力コンソーシアムの一角として浮体式ウィンドファーム実証事業に参加しているほか、東芝など9法人と共同でNEDOの次世代洋上直流送電システム開発事業に参加しており、洋上風力発電による電力の陸上までの長距離送電の効率化を進めている。実績としては、前述の通り長崎県五島市での浮体式発電設備を製造しているほか、将来的な洋上設備への導入を企図し、茨城県沿岸部の陸上に定格出力5MWのダウンウィンド式発電システムを完成させている⁶⁴。

現在、台湾の鉄鋼大手である中国鋼鉄と組んで台湾で5MW級の洋上風力発電の受注を目指し、台湾電力に提案中である（2016年時点）。

(3) 東芝

東芝は6社1協会による地域振興型アクア・ウィンド事業化研究会に参加して、地域協調や地域経済の活性化など地域振興に寄与する洋上風力発電事業の実現に向けた調査・検討・事業提案を行うことを目指している。また、日立製作所など9法人と共同でNEDOの次世代洋上直流送電システム開発事業に参加しており、洋上風力発電による電力の陸上までの長距離送電の効率化を進めている⁶⁵。

⁶² MHI ヴェスタス ウェブサイト

⁶³ 三菱重工業ウェブサイト

⁶⁴ 日立製作所ウェブサイト

⁶⁵ 東芝ウェブサイト

(4) 日本製鋼所

日本製鋼所は NEDO による福岡県北九州市沖での着床式洋上風力発電実証事業に参加しており、定格出力 2MW の設備を製造している⁶⁶。

4.4. 他国の主な研究開発動向

(1) アメリカ

アメリカではエネルギー省 (Department of Energy, DOE) が中心となり、多数の企業や研究機関とともに研究開発を進めている。2015 年度には風力発電のみで 1 億 700 万ドルの予算が執行されており、洋上風力発電の技術開発や実証事業に重点が置かれている。また、DOE は 2015 年に“Wind Vision”と題した報告書を公表している。これは 2050 年に全米の電力消費量の 35% を風力発電でまかなうという目標の達成に向けた施策についてまとめたものであるが、そのなかで洋上風力の均等化発電原価 (Levelized Cost of Electricity, LCOE) を 2020 年までに 22%、2030 年までに 43%、2050 年までに 51% 削減する⁶⁷としている。ただし、これらは技術開発のみによってではなく、風力資源探査、サプライチェーン整備、人材育成、制度設計などと合わせた複合的手法によって達成するとしている。

アメリカ初の洋上風力発電所となる予定であった、ケープコッド南方のナンタケット湾での Cape Wind プロジェクトは地方裁判所での敗訴、および控訴の棄却によって建設が遅れている⁶⁸が、ニュージャージー州 (Fisherman’s Energy, 20MW)、オレゴン州 (Principle Power, 30MW)、ヴァージニア州 (Dominion Virginia Power, 12MW) など複数の実証計画が進行中である。また、DOE のパシフィック・ノースウェスト国立研究所 (Pacific Northwest National Laboratory, PNNL) が風況および海中状況観測用のブイを開発しているほか、DOE と海洋大気庁 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) が共同で、航空機を用いたハリケーンの情報収集を行っている⁶⁹。こうした測定技術の開発によって、メーカーの設備設計や投資家の判断を補助することができる。

(2) ヨーロッパ

ヨーロッパの、特に北海は大部分が大陸棚上にあるため水深が浅く、着床式洋上風力発電の建設に適しているほか、年間を通じて風光が安定した偏西風の影響下にあるため、資源量にも恵まれている。現在の導入量上位四ヶ国のイギリス、デンマーク、ドイツ、ベルギーで世界の設備容量の 85% 以上⁷⁰を占めていることから、洋上風力発電の実用化が最も進んだ地域であるといえる。そして、これらの国々ではさらなる普及のため、研究機関や企業での技術開発が進められている。主な研究機関としてはイギリスの洋上再生可能エネルギーカタパルト (Offshore Renewable Energy Catapult, ORE Catapult)、デンマークのリンドー洋上再生可能エネルギーセンター (Lindoe Offshore Renewables Center, LORC)、ドイツのフラウンホーファー研究機構 (Fraunhofer-Gesellschaft) などがあげられる。各組織の研究プロジェクトの内容を見る限り、

⁶⁶ NEDO ウェブサイト

⁶⁷ DOE, “Wind Vision: A New Era for Wind Power in the United States,” 2015, p.250.

⁶⁸ *Renewable Energy World*, July 15, 2016.

⁶⁹ IEA Wind, “Annual Report for 2014,” 2015, p.188.

⁷⁰ IRENA データベース

風車やナセルの効率化やコストダウンを目標としているのは無論だが、海中支持構造の設計については浮体式よりは着床式に重点が置かれる傾向にあるといえる。

ヨーロッパでは各国レベルでの研究開発のみならず、欧州連合（European Union, EU）によって加盟国間共同で様々な分野の研究活動を行うための支援枠組みプログラム（Framework Programme, FP）が設けられている。2007年から2013年まで⁷¹実施されたFP7の終了後は、2014年から2020年までを実施期間としてHorizon 2020と呼ばれる新たな枠組みが立ち上げられている。洋上風力発電に関する研究プロジェクトは、風車の大型化、（着床式設備の）海中支持構造の設計、コストダウン、タービンのモニタリング、送電損失が少ない高圧直流送電網の海中配備、技術者の育成、など多岐にわたり、これらのプロジェクトには多くの加盟国の省庁、研究機関、企業が参加している。

⁷¹ FP7の枠組み自体は既に終了しているものの、その枠組みで補助を受けて実施中のプロジェクトは依然として多数存在する。

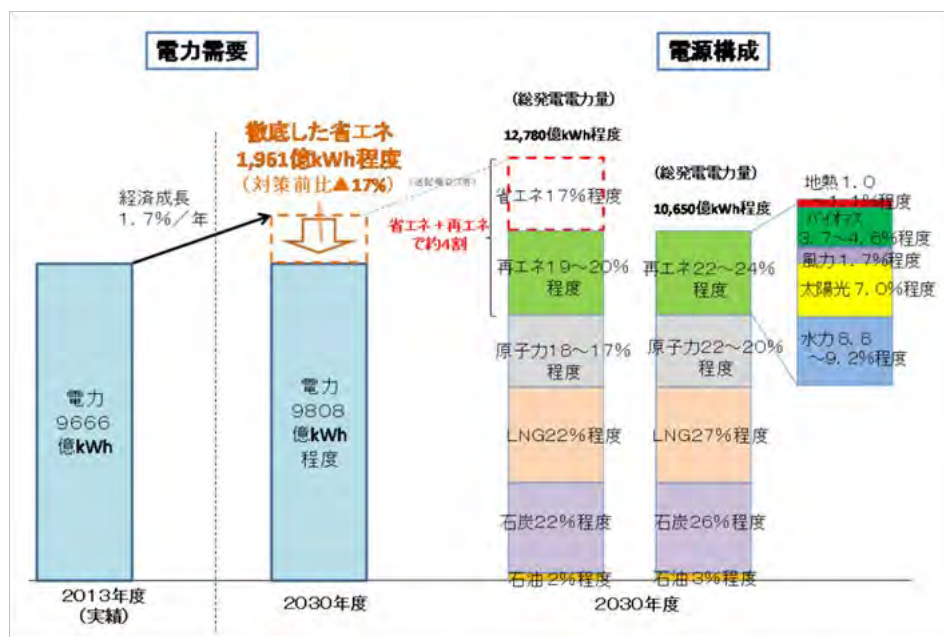
5. 高効率火力発電

5.1. 開発・導入の必要性

2015年7月に策定された長期エネルギー需給見通し（エネルギーミックス）の基本方針は、3E+S（安全性、安定供給、経済効率性、環境適合）を同時達成しつつ、バランスの取れた電源構成を実現するものとなっており、CO₂排出量と燃料費を抑制する観点から、2030年度の火力発電の構成は、石炭火力26%、LNG火力27%とされ、それぞれ高効率化を進め、環境負荷を低減しつつ活用する方針が示された。また、火力発電の高効率化は、再生可能エネルギーの最大限の導入促進、安全性の確認された原子力発電の活用とあわせ、温室効果ガス削減目標（2030年度に2013年度比26%削減）の積み上げの基礎となった対策・施策として位置づけられる。

2030年度のエネルギーミックスの実現と削減目標の達成のためには、技術確立時期の近い、石炭火力、LNG火力のさらなる高効率化に係る技術開発を加速し、実用化を促進していくことが重要である。その一方で、2030年度以降を見据えれば、経済成長と気候変動対策の両立のキギとなる革新的な技術を開発することも必要であり、技術確立までに長い時期を要することを踏まえ、現時点から戦略的に開発を進めていくことが必要である。

図 31 2030年度の電源構成（日本）



(出所) 長期エネルギー需給見通し (2015年7月)

世界に目を向けてみると、石炭火力の今後の需要の見通しについては、インド、中国、東南アジア諸国を中心として、経済発展とともに需要増大が見込まれるが、欧米では現在よりも減少する国が多い。一方、LNGを含むガス火力については、気候変動対策や近年のガス価格の下落傾向により、全世界的に増加する見通しとなっており、特に産ガス国が多い中東、アフリカや欧米では大幅な需要拡大が見込まれる。

アジア、アフリカ、中東等の新興国を中心に今後、火力発電の需要は、石炭火力、ガス火力それぞれの分野で大幅な拡大が見込まれる。そして、COP21で採択されたパリ協定を受けた対応を求められる中、石炭火力の高効率化やガス火力の推進など、各国はエネルギー・セキュリティや経済性等の固有事情に応じた取組みを進めることになるが、各国の事情に応じた適切な選択肢として、我が国の高効率火力発電技術の海外展開を促進することは、国際的な気候変動対策に対する貢献につながる。

5.2. 高効率石炭火力発電

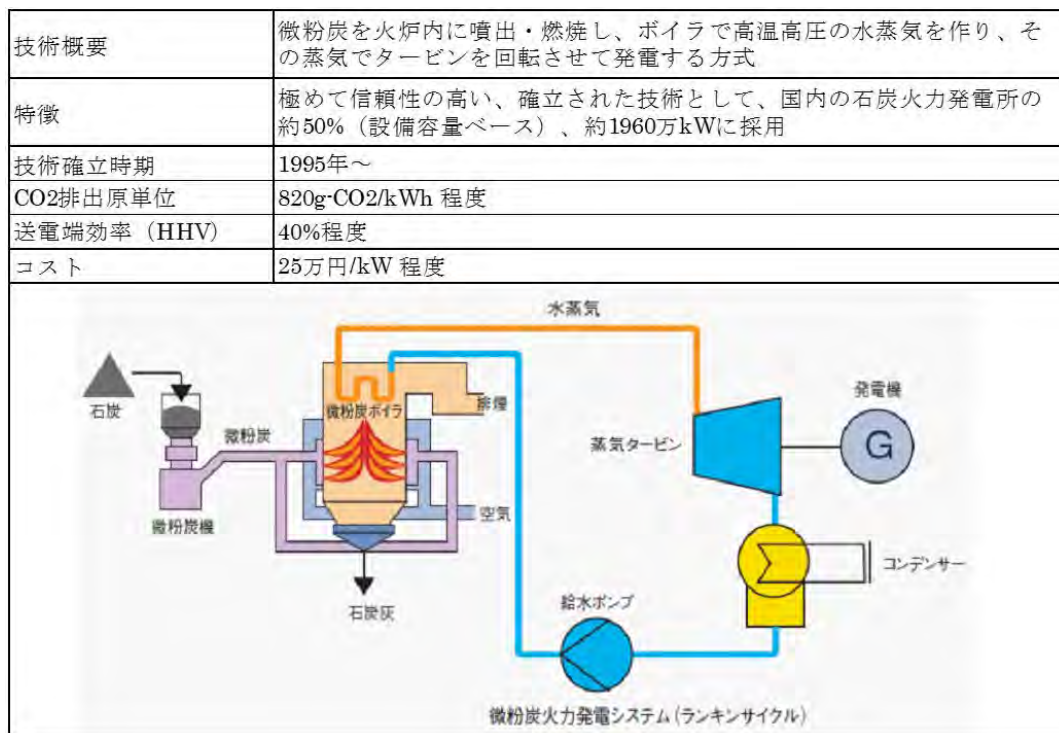
5.2.1. 技術の概要

石炭は可採埋蔵量が多く、石油や天然ガスと比較して経済性に優れており、エネルギー安定供給上重要な電源である。一方で、発電量あたりのCO₂排出量が多い等の課題を抱えているため、低炭素化を目指した発電の高効率化等の取組みが必要である。

第4次エネルギー基本計画（2014年4月11日閣議決定）においても、石炭は重要なベースロード電源燃料として再評価されており、高効率石炭火力発電の有効利用等により環境負荷を低減しつつ活用していくエネルギー源として位置づけられる。

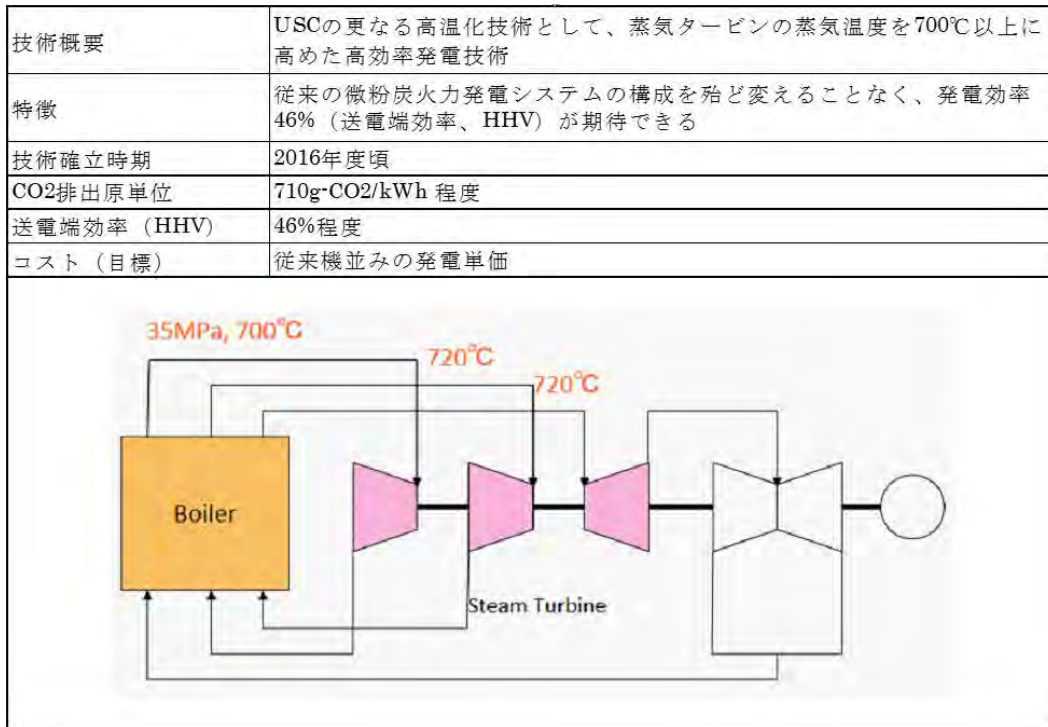
高効率石炭火力発電技術としては、研究段階のものも含め、超々臨界圧発電（USC）や石炭をガス化して発電する石炭ガス化複合発電（IGCC）、IGCCに燃料電池を組み合わせた石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）といった技術がある。

図 32 超々臨界圧発電（USC）の概要



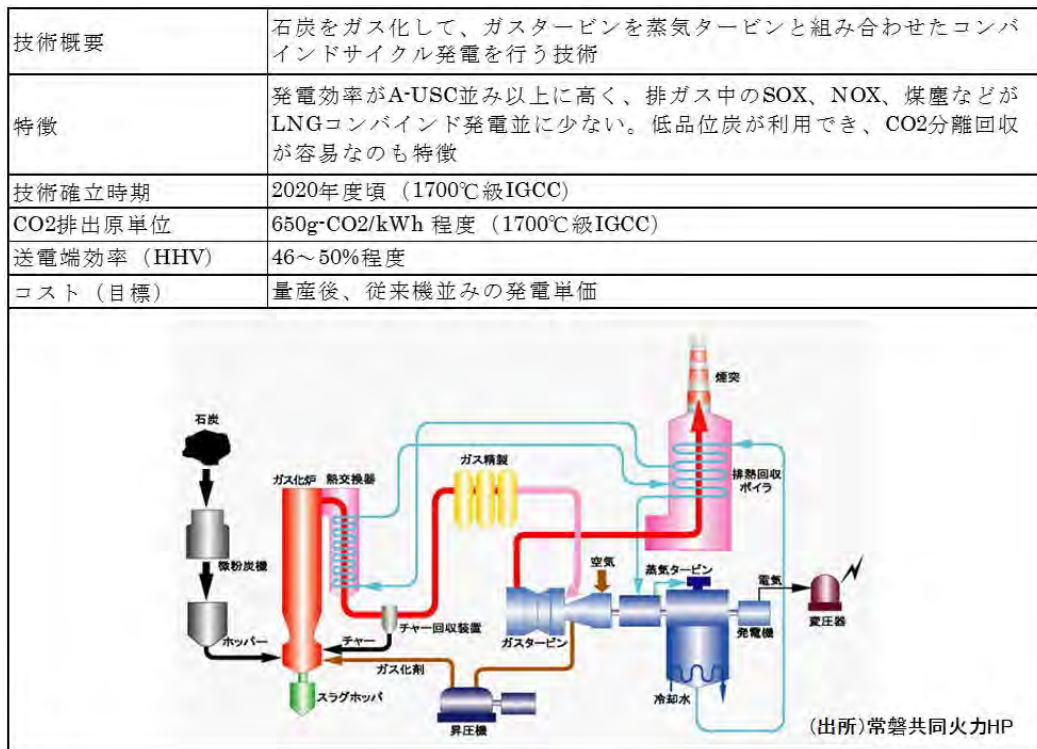
(出所) 次世代火力発電に係る技術ロードマップ技術参考資料集を基に作成

図 33 先進超々臨界圧発電 (A-USC) の概要



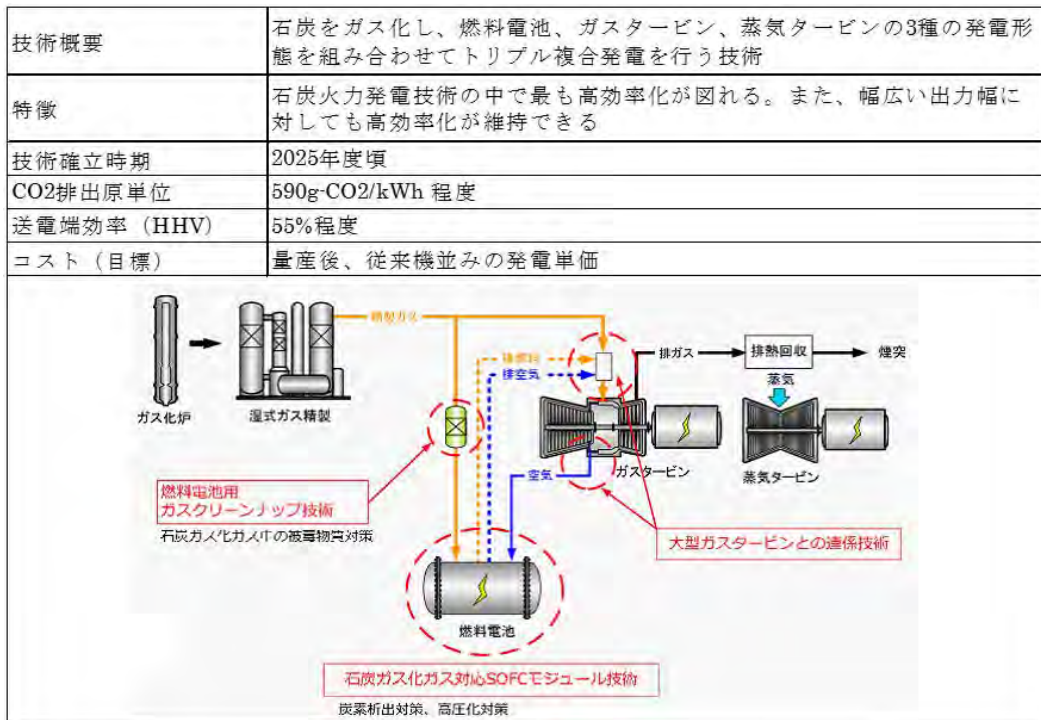
(出所) 次世代火力発電に係る技術ロードマップ技術参考資料集を基に作成

図 34 石炭ガス化複合発電 (IGCC) の概要



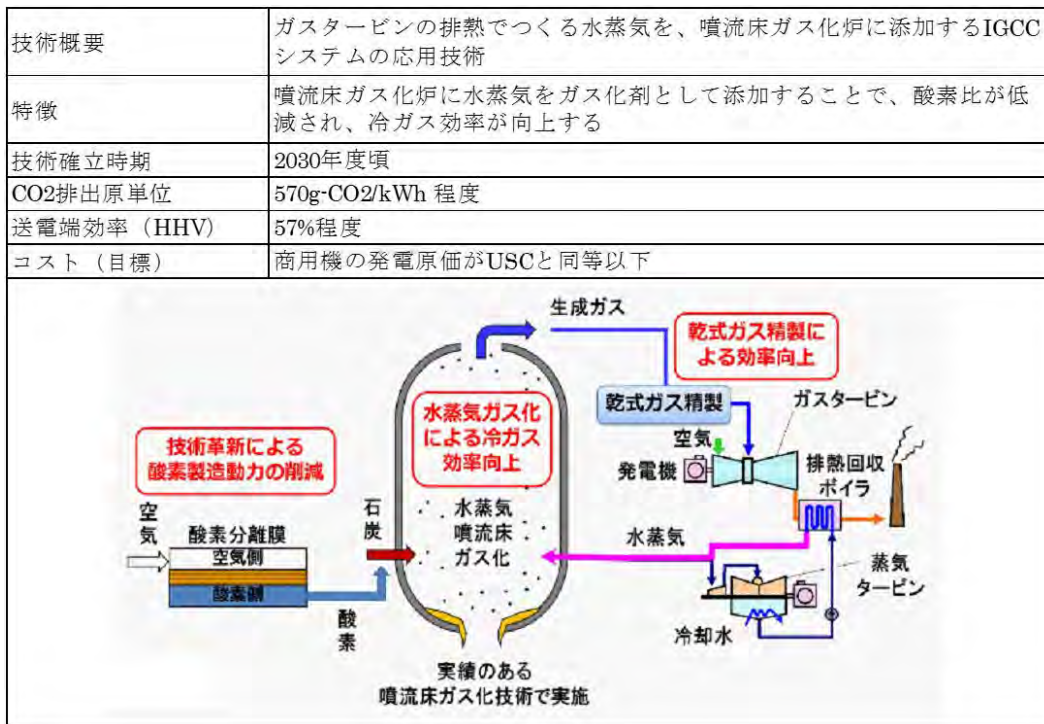
(出所) 次世代火力発電に係る技術ロードマップ技術参考資料集を基に作成

図 35 石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC) の概要



(出所) 次世代火力発電に係る技術ロードマップ技術参考資料集を基に作成

図 36 革新的IGCC (水蒸気噴流床ガス化技術) の概要



(出所) 次世代火力発電に係る技術ロードマップ技術参考資料集を基に作成

これら次世代の高効率石炭火力発電を実現・実用化することにより、一層の石炭火力の低炭素化が図られるものと期待される。また、将来 CCS が商用化して導入されれば、CO₂ 排出量をほぼゼロにすることが可能である。

5.2.2. 技術開発及び普及の現状

(1) 普及の現状

日本の石炭火力発電は、現在、超々臨界圧発電（USC）が最高効率の技術として実用化されている。一方で、世界の石炭火力発電所の大半は、米国と中国、そしてインドに集中しており、その多くは発電効率が 40%未満の従来型の発電方式となっている。USC を用いた発電所は日本や中国で導入が始まっているが、現段階においても、中国やインドといった新興国や発展途上国においては、設置する石炭火力発電所の大半が未だに従来型である。次世代の高効率石炭火力技術である先進超々臨界圧発電（A-USC）や低品位炭（亜瀝青炭、褐炭）も使用可能な石炭ガス化複合発電（IGCC）、石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）に関しては、IGCC を除いて各国ともまだ技術開発段階である。

表 12 日本の USC 火力実績

発電所名	会社名	定格出力 (MW)	主蒸気圧力 (Mpa)	蒸気温度 (°C)	運転開始 (年/月)
碧南3号	中部電力	700	24.1	538 / 593	1993/4
能代2号	東北電力	600	24.1	566 / 593	1994/12
七尾大田1号	北陸電力	500	24.1	566 / 593	1995/3
原町1号	東北電力	1,000	24.5	566 / 593	1997/7
松浦2号	J-POWER	1,000	24.1	593 / 593	1997/7
三隅1号	中国電力	1,000	24.5	600 / 600	1998/6
七尾大田2号	北陸電力	700	24.1	593 / 593	1998/7
原町2号	東北電力	1,000	24.5	600 / 600	1998/7
橘湾	四国電力	700	24.1	566 / 593	2000/6
橘湾1号	J-POWER	1,050	25.0	600 / 610	2000/7
敦賀2号	北陸電力	700	24.1	593 / 593	2000/9
橘湾2号	J-POWER	1,050	25.0	600 / 610	2000/12
苅田新1号	九州電力	360	24.1	566 / 593	2001/7
碧南4号	中部電力	1,000	24.1	566 / 593	2001/11
苫東厚真4号	北海道電力	700	25.0	600 / 600	2002/6
碧南5号	中部電力	1,000	24.1	566 / 593	2002/11
磯子新1号	J-POWER	600	25.0	600 / 610	2002/4
荅北2号	九州電力	700	24.1	593 / 593	2003/6
常陸那珂1号	東京電力	1,000	24.5	600 / 600	2003/12
広野5号	東京電力	600	24.5	600 / 600	2004/7
舞鶴1号	関西電力	900	24.5	595 / 595	2004/8
磯子新2号	J-POWER	600	25.0	600 / 620	2009/7
舞鶴2号	関西電力	900	24.5	595 / 595	2010/8
広野6号	東京電力	600	24.5	600 / 600	2013/12
常陸那珂2号	東京電力	1,000	24.5	600 / 600	2013/12

(出所) JCOAL

(2) 技術開発の現状・動向

①日本

日本では、「先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発」において、A-USCの技術開発に対する支援が2008年度から2016年度までの期間で継続的に実施されており、材料メーカーやプラントメーカーが共同で要素技術の開発を行っており、2016年頃に発電効率46%（700℃級）、それ以降には更なる高効率化を目指している。空気吹ガス化技術を用いた空気吹IGCCについては、2012年度末をもって福島県いわき市で実証試験が終了し、商用転用されている。一方、酸素吹IGCCの実用化に向けては、「石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業」（大崎クールジェンプロジェクト）において酸素吹IGCCの技術開発・実証に対する支援が2012年度から実施されており、中国電力（株）の大崎発電所構内で実証試験設備を構築し、2015年度から試運転を開始したところである。2016年度からNEDOが事業を継承し、2017年3月には実証試験を開始する予定で、IGCCについては、2020年頃に46～50%（1,700℃級）、長期的にはA-IGCCとして更なる効率向上を目指している。

また、大崎クールジェンプロジェクトでは、今後、酸素吹IGCC実証試験に加え、CCS分離・回収設備及び燃料電池を組み込んだIGFCについても検討していく予定である。IGFCは、まだ実用化まで時間がかかるとみられているが、2025年頃に発電効率55%（1,300℃級）、長期的にはA-IGFCとしてさらなる効率向上を目指している。

大崎クールジェンプロジェクト全体工程

年度	平成24年度 (2012年度)	平成25年度 (2013年度)	平成26年度 (2014年度)	平成27年度 (2015年度)	平成28年度 (2016年度)	平成29年度 (2017年度)	平成30年度 (2018年度)	平成31年度 (2019年度)	平成32年度 (2020年度)	平成33年度 (2021年度)
第1段階 酸素吹IGCC実証	酸素吹IGCC詳細設計・建設					実証試験				
	・設計製作 ・土木工事	・設計製作 ・土木工事	・設計製作 ・土木工事 ・機電工事	・設計製作 ・土木工事 ・機電工事 ・水圧試験 ・受電	・機電工事 ・ガス化運転 ・設備竣工	<ul style="list-style-type: none"> 基本性能確認 <ul style="list-style-type: none"> ▶プラント性能 ▶環境性能 多炭種適用性確認 設備信頼性確認 <ul style="list-style-type: none"> ▶長時間耐久試験 制御性、運用性確認 <ul style="list-style-type: none"> ▶負荷変化率 ▶起動停止時間 経済性評価 				
第2段階 CO2分離・回収型 IGCC実証	適用技術評価概念設計		CO2分離・回収詳細設計・建設			実証試験				
			・EAGLEのCO2分離・回収試験結果から実証試験地点に適したCO2分離・回収方式（物理、化学）を評価選定	・既存設備改造 ・CO2分離・回収IGCC実証試験設備の設計・製作・建設			・CO2分離・回収IGCCシステム実証			
第3段階 CO2分離・回収型 IGFC実証	技術調査概念設計				CO2回収一体型IGCC/IGFC 詳細設計・建設				実証試験	
					・石炭ガス化ガスの燃料電池への利用可能性調査、燃料電池設備の試設計による予備検討				・既設設備改造 ・IGFC基盤技術検証試験設備の設計・製作・建設	

出典：酸素吹石炭ガス化技術の開発（電源開発株 2015.6、次世代火力発電協議会（第1回会合）資料2-3）

また、NEDOにおいてはクリーン・コール・テクノロジー（CCT）分野の研究開発は以下のように実施している。

図 37 : NEDO における CCT 分野の研究開発

低炭素化 の実現	1.次世代火力発電等 技術開発	1-1 発電効率の向上	
		1-2 CO2回収技術	
		1-3 次世代火力発電技術推進事業	調査事業
	2.環境調和型製鉄プロセス技術開発(STEP2)		
エネルギー セキュリティ の確保	3.低品位炭利用 促進事業	3-1 低品位炭利用促進事業可能性検討	低品位炭利用
		3-2 低品位炭利用促進技術開発	
		3-3 低品位炭利用促進技術実証(1/2助成)	
環境対策	4.石炭利用環境 対策事業	4-1 石炭利用環境対策推進事業	調査事業
		4-2 石炭利用技術開発(2/3助成)	—
	5.石炭高効率利用技術共同実証事業		
CCTの普及	6.石炭高効率利用システム案件等形成調査事業		石炭FS
	7.国際エネルギー消費効率化等技術・システム実証事業		

(出所) NEDO 石炭高効率利用システム案件等形成調査事業 発表資料 (平成 28 年 7 月 14 日)

また、その中で、石炭高効率利用システム案件等形成調査事業（石炭 FS 調査）にて平成 27 年度と平成 28 年度に採択された案件は以下のとおりであり、我が国の高効率発電技術（USC,IGCC 等）等を海外市場に普及させることを目的としている。

(平成28年度 石炭FS調査第一次公募採択案件)

件名	委託先
エジプト・アラブ共和国におけるエジプト電力公社向け超々臨界石炭火力発電所建設プロジェクト案件形成調査	住友商事(株)、東電設計(株)
カナダ・サスカチュワン州における石炭焚き火力発電所排ガスからの化学吸収法CCUSプロジェクトの案件形成調査	(一財)石炭エネルギーセンター、三菱重工業(株)、三菱日立パワーシステムズ(株)
パキスタンにおけるガス化等による未利用炭有効利用プロジェクトの案件発掘調査	(一財)エネルギー総合工学研究所
バングラデシュ国における超々臨界圧石炭火力IPPプロジェクト案件発掘調査	住友商事(株)、(株)サミット・グローバル・パワー
ブラジルにおける高効率石炭火力発電(超々臨界圧発電)プロジェクト案件形成調査	PwCアドバイザリー合同会社、東京電力ホールディングス(株)、(株)IH1

(平成27年度 石炭FS調査採択案件)

件名	委託先
ブラジルにおける高効率石炭火力発電プロジェクト案件発掘調査	プライスウォーターハウスクーパース(株)
インドネシアにおける低品位炭燃焼による大型超々臨界圧石炭火力導入可能性の案件発掘調査	電源開発(株)
インドネシア国における改質褐炭(UBC)製造プロジェクトの案件形成調査	(株)神戸製鋼所
インド共和国におけるアンドラ・プラデシュ州発電公社向けスリカクラム超々臨界石炭火力発電所建設プロジェクト	住友商事(株)、日本工営(株)
ハンガリーボルソド地区における石炭ガス化プロジェクトの案件形成調査	千代田化工建設(株)、(一財)日本エネルギー経済研究所
タイにおける低品位炭焚きIGCCプロジェクト案件形成調査	三菱日立パワーシステムズ(株)、三菱重工業(株)
カナダにおける酸素燃焼CCUSプロジェクトの案件形成調査	(株)IH1、電源開発(株)、(一財)石炭エネルギーセンター、三井物産(株)
ポーランドにおける遡青炭焚きIGCCプロジェクトの案件発掘調査	三菱日立パワーシステムズ(株)、三菱重工業(株)
チリにおける高効率石炭火力プロジェクトの案件発掘調査	(株)三菱総合研究所、東京電力(株)、三菱日立パワーシステムズ(株)
カザフスタンにおける移動電極型電気集塵装置(MEEP)による石炭火力発電所環境改善プロジェクトの案件合理化調査	三菱日立パワーシステムズ環境ソリューション(株)、あずかグリーンインベストメント(株)
インドネシアにおける地方電化率向上のためのバイオマス混焼循環流動層ボイラ発電設備の設置プロジェクト案件発掘調査	住友重機械工業(株)、(一財)石炭エネルギーセンター
インドにおける市街地対応型・環境配慮型高効率石炭火力発電プロジェクトの案件形成調査	電源開発(株)、九州電力(株)、(一財)石炭エネルギーセンター

(出所) NEDO 石炭高効率利用システム案件等形成調査事業 発表資料(平成28年7月14日)

②米国・EU

A-USCの開発は、米国や欧州でも進められており、欧州では電力・メーカーを主体としたAD700プロジェクトにおいて、現在700℃の蒸気を用いた各種要素試験が行われている。

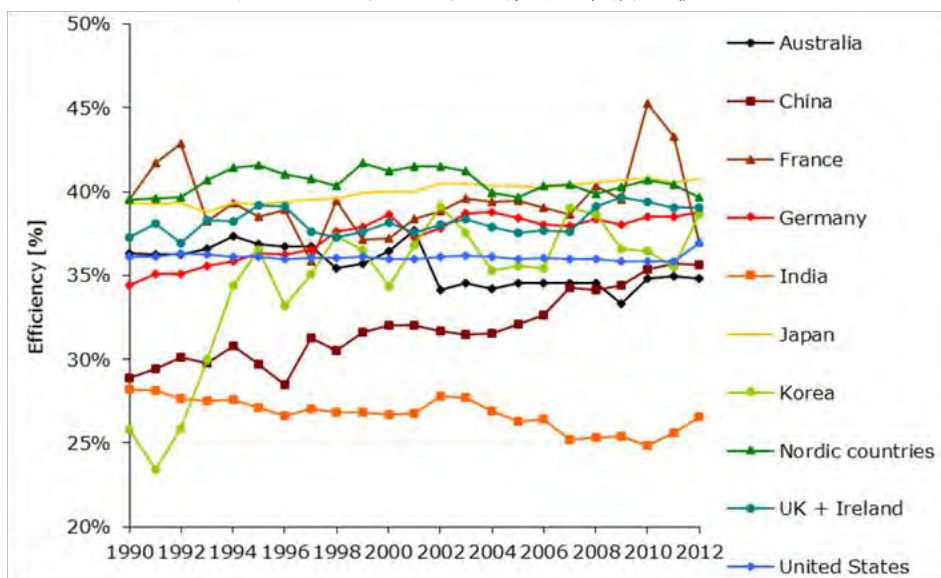
IGCCについては、欧米でも1990年代半ばより、300MW級の本格的なIGCC実証・商用計画が進められ、米国やオランダ、スペインにおいて運転が行われている。この内、米国のタンパとスペインのプラントにおいては、CO2分離・回収の実験も行われており、米国では500MW級と600MW級のプラントの建設も進んでいる。米国では、「クリーン・コール・パワー・イニシアチブ」(CCPI)や、「クリーン・コール技術実証プログラム」といった計画があり、これらの計画の中ではガス化技術や排ガス制御技術、燃料プロセス技術等の革新を通して、将来的にゼロ・エミッションまたはそれに近い石炭火力の実現を目指している。

EUは、クリーン・コール政策として、①CCS(CO2分離回収・貯留)、②IGCC(石炭ガス化複合発電)の推進に向けた資金支援プログラムを導入し、③USC(超々臨界圧発電)、A-USC(先進超々臨界圧発電)ではEU企業参加による共同開発を推進している。CCSについては、現在パイロットプロジェクト導入の段階で、2020年以降の商業実用化を目指している。

(3) 国際競争力

日本の石炭火力発電設備の平均発電効率(発電端)は40%を超えており(高位発熱量ベース、HHV)、世界最高の水準にある。今後、世界の電力需要は今後も着実に増大が見込まれており、CO2排出削減の観点から、日本の石炭火力発電技術への期待は高い。

図 38 石炭火力発電効率の国際比較



(出所) International Comparison of Fossil Power Efficiency and CO2 Intensity 2015

しかしながら、超高効率石炭火力発電の主流となるIGCC、IGFCの技術開発は、欧米企業と

競合しており、日本における更なる研究開発と実用化への取り組みが必要である。なお、仮に、日本の超々臨界圧発電（USC）の技術を米中等の海外の石炭火力発電に導入した場合、全世界のエネルギー起源CO₂を15億t-CO₂削減できるとの試算⁷²がある。

5.2.3. 技術開発及び普及の課題

A-USCについては、電力産業用大容量ボイラー・タービンシステム、高温弁技術の開発が主要な課題となっている。また、700℃以上の高温蒸気にも耐えられる材料の開発も必要である。これらの候補材料として、ニッケル基材料の適用が考えられており、最終的には2016年頃に発電効率を46%へ引き上げることが可能になると見込まれている。

IGCCについては、2012年度末をもって、福島県いわき市での空気吹IGCCの実証試験を終了し、商用転用されている。今後はガスタービンの高効率化、燃焼部分等の技術開発等が課題である。また、ガス化炉やタービン等の全体システムの信頼性確保が不可欠である。さらに、高水分含有等の性質からハンドリングが困難であるため産炭地での利用が主であった低品位炭（亜瀝青炭、褐炭）は、揮発成分が多く分解し易いことから、従来の石炭火力発電で利用される高品位炭よりもガス化に適している。そのため、この低品位炭の利用のための技術開発やガス化技術の開発を通じて、2020年頃までに発電効率を46～50%（1700℃級）まで高めることが可能と見込まれている。

5.2.4. 技術開発及び普及に向けた施策

空気吹IGCCについては、実証試験の終了により、技術的には商用機建設が可能な段階に入っているが、設備が複雑となる分、建設費が2割程度高くなってしまうと言われ、経済性が最大のハードルとなっており、現在、国内では商用機の建設計画が決まっていない。IGCC等の実用化に向けて、全体システムの信頼性を確立するための実証事業等の推進が必要である。

東京電力(株)は、2014年1月に認定された新・総合特別事業計画に50万kW級の世界最新鋭の高効率石炭火力発電所（IGCC）の建設・運転プロジェクトを挙げ、「福島復興大型石炭ガス化複合発電設備実証計画」の環境影響評価手続きを進めている。計画は、50万kW級のIGCC設備を広野地点（単独）及び勿来地点（常磐共同(株)と共同）の2地点に建設、運用するもので、2020年代初頭の運転開始を予定している。

なお、IGCC向きの石炭と微粉炭火力向けの石炭は異なることから、IGCCと微粉炭火力が共存していくことが日本で使える炭種の幅を広げることにつながる。

⁷²http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/005/pdf/005_07.pdf

5.2.5. 導入見込みの事例、市場規模

IEAの「低炭素石炭火力技術ロードマップ」では、2050年時点において、世界中の石炭火力発電所の全てが670g-CO₂/kWh以下の石炭火力、またはCCSと組み合わせた発電所となるよう、高効率石炭火力導入を図っていくこととしている。

IEAのETP2010では、世界全体で2050年に2005年比でCO₂排出量を半減させるためのエネルギー・環境技術の構成が分析されている（BLUEシナリオ）が、高効率石炭火力発電によるCO₂削減効果（CCSを除く）は、以下となっている。

- ・ SC/USCの導入：0.42Gt-CO₂（発電分野による削減の3%）
- ・ IGCCの導入：0.56Gt-CO₂（同、4%）

また、IEAのETP2012の見通し（2DSシナリオ）では、高効率石炭火力発電の導入により、2010年から2050年にかけて必要とされる投資総額は1.9兆米ドルと見積もっており、年平均では4兆7,500億円（1ドル=100円換算）程度の市場が期待される。

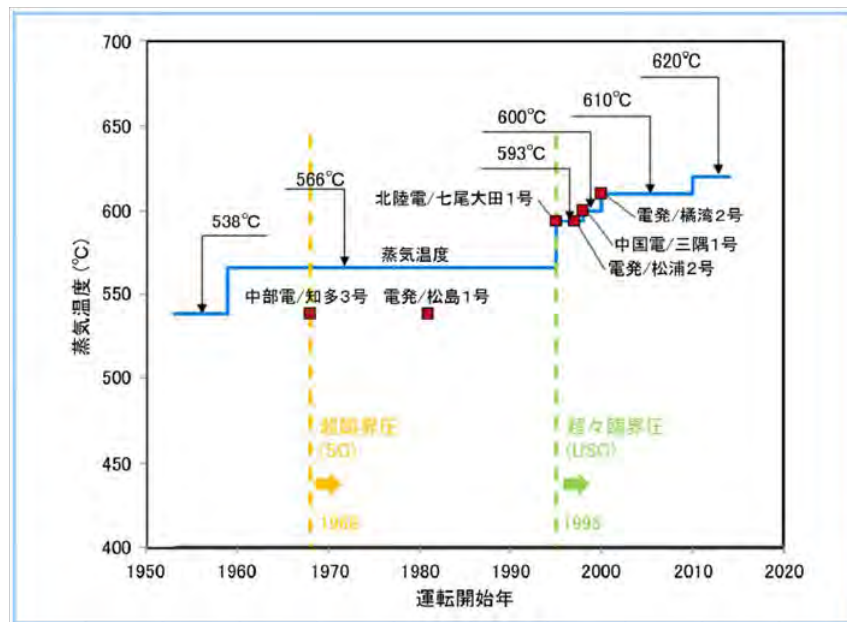
5.2.6. 国内企業、競合相手

（1）三菱日立パワーシステムズ（MHPS）

①技術開発動向

1990年代より、燃料として安価な石炭の採用が増加するとともに環境保全型発電プラントへのニーズも高まり、こうしたニーズに応じてMHPSでは汽力発電の効率向上施策として、蒸気条件の高温化・高圧化を図ってきた。現在、最新鋭のプラントではUSC（超々臨界圧）と呼ぶ24.1MPa 593℃以上となる蒸気条件を適用している。1995年に再熱蒸気温度に593℃を採用したUSC石炭焚きボイラである北陸電力（株）七尾大田火力1号機（500MW 24.1MPa 566/593℃）を納入し、これまで、MHPSは国内外合わせ150缶超のUSC/SCボイラを製作し、納入している。

図 39 汽力発電設備の蒸気条件と運転開始年



(出所) 三菱重工技報 Vol.52 No.02 (2015)

また、近年石炭焼き発電プラントの燃料として良質な瀝青炭だけでなく、亜瀝青炭や褐炭のような安価な低品位炭へのニーズが高まっており、低品位炭にも対応した最新技術の USC ボイラを提供する一方、A-USC や IGCC といった最先端の高効率発電技術の開発も行っている。IGCC に関しては、空気吹ガス化方式は既に勿来 250MW 機にて実証・商用化し、酸素吹ガス化方式では大崎クールジェンプロジェクトに参画している。

②海外への事業展開状況

MHPS はこれまで、国内では 26 基、海外では 120 基超の石炭焚き SC/USC 発電設備の納入実績を持っている。SC/USC 技術のグローバル展開としては、積極的に低品位炭焼き USC/SC ボイラのプロジェクトに取り組んでおり、これまで培った豊富な低品位炭焼き技術を基に USC/SC ボイラへ展開している。実際に、インドネシアの亜瀝青炭焼き SC ボイラのプロジェクトやドイツの褐炭焼き USC ボイラのプロジェクトは低品位炭焼きであり、SC または USC の条件を採用し、MHPS の石炭に対する幅広い実績と知見をボイラ設計に反映し、非常に信頼性の高いボイラとなっている。

(2) IHI

①技術開発動向

国内最大出力の 105 万 kW 級火力発電設備用石炭焼きボイラを始め、国内外で、電力安定供給の一翼を担う電力事業用ボイラのサプライヤーとして、プラントの高効率化を目指した蒸気条件の向上に努め、世界最高レベルの蒸気条件を達成している。超々臨界圧石炭焼きボイラの国内シェアは、約 35% となっている (2014 年度末時点)。

石炭火力の発電効率向上は、ここ 20 年で飛躍的に向上したにも関わらず、CO2 排出

量が高いことから、さらなる高効率化が求められており、高効率化を実現する方法の一つとして、700℃級先進超々臨界圧（A-USC）が注目されており、2008年から国家プロジェクトとして「先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発」が開始され、IHIはボイラメーカーとして参画している。A-USCは現用の600℃級USC発電技術をベースに蒸気温度を100℃向上させた技術であるため、新規発電プラントのみならず、既存施設の改造もしくはリプレースにも適用可能な技術として期待されている。

②海外への事業展開状況

IHIは、2007年度以降、欧米を中心に、火力発電所向けボイラ機器単体供給の事業を行ってきたが、ボイラ機器単体供給だけでは市場が限定されているほか、アフターサービスなどを手掛けることが難しくなったことから、ライフサイクルビジネスへの展開を図り、長期的かつ安定的な利益を確保していく方針に転換した。海外においてEPC事業を展開すべく、IHIグループの海外拠点を活用でき、他社との差別化ができる大型超臨界圧ボイラの需要がある東南アジア市場を中心に取り組んでいる。2014年度にはモロッコでアフリカ初となる超々臨界圧大型石炭火力発電ボイラを受注するなど、全世界でプレゼンスを拡大している。

5.3. 高効率LNG発電

5.3.1. 技術の概要

LNG火力は、石炭や重油を燃料とする火力発電と比較して、発電量あたりのCO₂排出量は低く、将来的にも国内外で拡大が見込まれる発電方法であり、大出力化、高効率化、そしてコンバインドサイクルの導入等を通じ、さらなる低炭素化が図られている。加えて、CCS（二酸化炭素回収・貯留）との組み合わせにより、さらなる低炭素化が可能となる。

日本のLNG火力発電は、世界に先駆けて1500℃級のガスタービン（熱効率52%）が実用化されている。コンバインドサイクル発電の効率向上に関しては、燃焼温度の高温度化が主な手段となっており、1700℃級の超高温のガスタービンの開発・導入が進められている。また、日本では、高湿分空気利用タービン（AHAT）と呼ばれる技術の開発も進められており、これは蒸気タービンとのコンバインドサイクルとせず、作業流体量の増加を通じてガスタービンサイクル自体の高効率化を追求したものである。この技術は、現在の電力業界のニーズである、再生可能エネルギー導入拡大時のバックアップ電源としての適性が高い、高効率な中容量ガスタービン（10～20万kW）にマッチするものである。また、自家発電機用としても、既存のものと比較してかなり高効率であり、自家発電分野におけるCO₂削減への貢献も期待される。

図 40 高湿分空気ガスタービン (AHAT) の概要

技術概要	高湿分空気を利用した日本オリジナルのガスタービン単独発電技術。コンバインドサイクルの蒸気タービン蒸気量に匹敵する湿分を増湿塔で燃焼器に加え、ガスタービン排熱を再生熱交換器で回収、利用する
特徴	中小容量機 (10万kW程度) 向けのガスタービン発電技術で、コンバインドサイクルの効率を凌ぐことが可能
技術確立時期	2017年度頃
CO2排出原単位	350g-CO2/kWh 程度
送電端効率 (HHV)	51%程度
コスト (目標)	従来機並みのイニシャルコスト

(出典：第4回次世代火力発電協働会資料(MHPSほか)2015.6)

(出所) 次世代火力発電に係る技術ロードマップ技術参考資料集を基に作成

図 41 ガスタービン複合発電 (GTCC) の概要

技術概要	天然ガスなどを原料にガスタービンで発電を行い、次にその排熱を使って蒸気をつくり、蒸気タービンで発電するコンバインド発電技術
特徴	大型ガスタービンの高温化は日本が世界をリード。1600℃級ガスタービンで世界最高の熱効率55%を達成し、更に1700℃級 (目標熱効率57%) の技術開発を実施中。石炭火力に応用可能で、技術展開や波及効果が大
技術確立時期	2020年度頃 (1700℃級)
CO2排出原単位	310g-CO2/kWh 程度 (1700℃級)
送電端効率 (HHV)	57%程度 (1700℃級)
コスト (目標)	量産後、従来機並みのイニシャルコスト (1700℃級)

(出所)北海道電力HP

(出所) 次世代火力発電に係る技術ロードマップ技術参考資料集を基に作成

図 42 ガスタービン燃料電池複合発電 (GTFC)

技術概要	石炭ガスや天然ガスを改質して水素を取り出して燃料電池で発電した後、改質残ガスをガスタービンに供給して発電し、さらに排熱を利用して蒸気タービンで発電するトリプル複合発電技術
特徴	ガス火力発電技術の中で最も高効率化が図れる。また、幅広い出力幅に対しても高効率化が維持できる
技術確立時期	2025年度頃
CO2排出原単位	280g-CO2/kWh 程度
送電端効率 (HHV)	63%程度
コスト (目標)	量産後、従来機並みの発電単価

(出所) 次世代火力発電に係る技術ロードマップ技術参考資料集を基に作成

5.3.2. 技術開発及び普及の現状

(1) 普及の現状

米国では、2013年4月よりフロリダ州において、発電効率が約54%（送電端、高位発熱量基準）となる高効率ガスタービンの営業運転を開始している。日本では、1,600℃級のガスタービンの開発が完了し、2013年8月より関西電力の姫路第二発電所（発電効率54%、送電端、高位発熱量基準）にて営業運転を開始している。

AHAT に関しては、日本における材料等の開発が完了し、実証機における試験が始まったばかりであるため、商業化についてはまだ時間がかかるとみられている。

(2) 技術開発の現状・動向

①日本

日本では、高効率ガスタービン技術の実用化への支援を行っており、2012年度からは「高効率ガスタービン技術実証事業」において、これまで実用化開発を行ってきた、高効率ガスタービン実用化要素技術開発及び高効率ガスタービン実用化技術開発の成果の展開に取り組んでいる。同事業では、「1700℃級ガスタービン技術実証事業」として、大容量機（出力40万kW程度、コンバインド出力60万kW程度）の高効率化に必要となる、先端要素技術を適用した各要素モジュールの開発を行うとともに、システムの長期信頼性等の検証を行っている。また、「高温分空空気利用ガスタービン技術実証事業」において、

更なる信頼性向上を目的とした技術開発や、実証機によるシステム性能、燃料多様性等の検証が開始されている。

日本は、コンバインド発電に関して、2015年頃に1,600℃級で54%、2020年度には1,700℃級で57%の発電効率を達成することを目指している。また、日本の独自技術である高温分空気利用ガスタービン（AHAT）については、2020年頃までに100MW級で51%の発電効率を実現することを目指している。

②米国・EU

1700℃級ガスタービンの開発は、石炭ガス化複合発電等、他の発電技術にも適用可能な重要技術であり、米国においてもエネルギー省（DOE）の「高効率エンジン・タービンプログラム」（HEET）の中で、国家的な支援の下で技術開発が進められている。欧州においても、CAME-GTと呼ばれるイニシアチブの中で高効率ガスタービンの開発が推進され、第7次技術開発枠組計画（FP7）（2007年～2013年）が終了した後、Horizon2020という2014年～2020年にわたって総額800億ユーロ規模のEU研究・イノベーションの枠組み計画の下、個別の技術要素の改良に向けた研究開発が実施されている。米国エネルギー省（DOE）の国家プロジェクトでは、ガスタービンメーカーや大学に2003年から2015年にかけて約1,000億円を投資しており、将来的に低位発熱量ベースで75%の発電効率の達成を目指している。

（3）国際競争力

日本では、入口ガス温度を1,600℃まで高め世界最高水準の発電効率（送電端、高位発熱量）54%を実現した「1,600℃級複合発電」が2013年に営業運転を開始したように、日本の技術開発レベルは世界最高水準にある。ガスタービンの高温化はスピードが非常に早く、国家間の開発競争は熾烈を極めていている。発電用ガスタービンは、1980年代初頭の複合発電システムの導入以降、年間約20℃という早いペースで燃焼温度の高温化が進み、熱効率が改善してきた。熾烈な開発競争の中、高温化に対して技術的に開発が可能な国は、米・独・日の3カ国に絞られつつある。

5.3.3. 技術開発及び普及の課題

天然ガス火力発電の更なる効率向上に向けた1,700℃級ガスタービンの開発では、タービン入り口温度の超高温化に向けて、超高耐熱合金をはじめとする高温耐熱性タービン材料及びその加工技術の開発、高性能冷却システム、低熱伝導率遮熱コーティング（TBC）、高負荷・高効率のタービン・圧縮機の開発が主要な課題となっている。これらの技術が開発されることにより、現状最大52%の発電効率を57%（2020年頃）に上げることが目標となっている。

日本独自の新たな技術であるAHATは、現在の電力業界のニーズである高効率な中容量ガスタービンに適合するものであり、高負荷・高効率圧縮機設計技術の確立やタービン翼冷却技術の確立が必要である。

5.3.4. 技術開発及び普及に向けた施策

1500℃級と比較して、1700℃級複合発電設備を実用化する場合、設備のコストアップが懸念材料として考えられるため、更なるタービンの低コスト化が重要である。

また、AHATについては電力事業者だけでなく、ガス会社や自家発用として一般事業者が導入することも考えられ、普及を促進するためには、初期費用等の負担を軽減する措置が必要である。

5.3.5. 導入見込みの事例、市場規模

IEAのWEO2013では、世界全体の天然ガス火力の発電量は、2011年の4,847TWhから2035年には9,173TWhとほぼ倍増する（現状政策シナリオ）と予想されており、高効率天然ガス火力に対する需要の可能性は大きいと考えられる。

大型ガス火力に関しては、日本、米国、EU、アジアの一部を中心に、1400℃級から1500℃級へ主力機が移行しており、今後も引き続き、超高性能機へ移行していく可能性は高く、大型ガスタービンの台数で年間200台程度の需要はありと予想されている。

IEAのETP2010（BLUEシナリオ）では、高効率ガス火力発電によるCO₂削減効果（CCSを除く）は、以下となっている。

- ・ 燃焼温度の高温度化による効率化：0.28Gt-CO₂（発電分野による削減の2%）
- ・ 石炭からの代替：0.98Gt-CO₂（同、7%）

また、IEAのETP2012の見通し（2DSシナリオ）では、高効率ガス火力発電導入による2030年から2050年にかけて必要とされる投資額は年平均210億USドル、約21兆円（1ドル=100円換算）程度の市場が期待されるとみられている。

5.3.6. 国内企業、競合相手

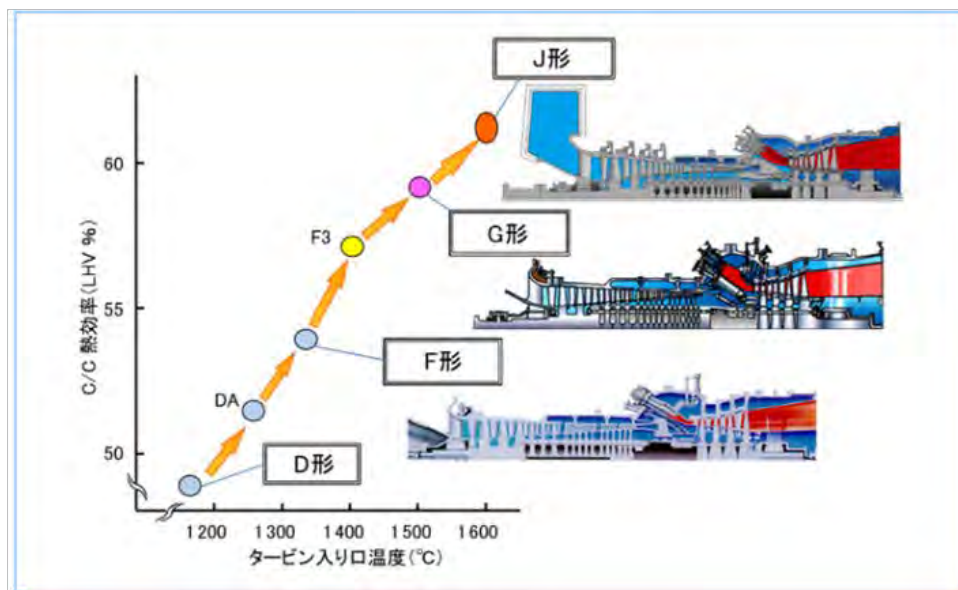
（1）三菱日立パワーシステムズ（MHPS）

①技術開発動向

三菱日立パワーシステムズ（MHPS）は、豊富な運転実績と先端技術研究に基づいたガスタービン開発により、地球環境保全およびエネルギーの安定供給に貢献している。最近では、2004年から参画した国家プロジェクト「1700℃級超高温ガスタービン要素技術開発」の開発成果を活用して、世界初のタービン入口温度1600℃の高効率機であるM501J形ガスタービンを開発し、2011年MHPS高砂工場内実証設備にて実証運転を開始、その後世界で販売、運転実績を重ねている。M501J形ガスタービンの商用機は、2012年より試運転を開始した。関西電力（株）姫路第二発電所、韓国4発電所にて順調に運転実績を重ねて、関西電力（株）姫路第二発電所では2013年8月から商用運転に入っている。

いる。J形ガスタービンでは、燃焼器に蒸気冷却方式を採用しているが、タービン入口温度を高く維持したまま空冷化できれば、GTCCの更なる効率化と運用性改善が期待できる。以上のことから、MHPSは次世代GTCCの開発を行っており、タービン入口温度の高温化を指向して東北電力（株）との共同研究を行ったクローズド（次世代）空冷システムなど、空冷式1650℃級ガスタービンの要素開発技術に着手し、複合発電効率63%を目標に、2020年代の実用化を目指して取り組んでいる。

図 43 MHPSによる大型ガスタービン機種開発の変遷



(出所) 三菱重工技報 Vol.52 No.02 (2015)

②海外への事業展開状況

MHPSの最新鋭ガスタービンであるJ形ガスタービンは、2012年に商用運転を開始した世界最大級の高効率ガスタービンで、実績のあるG形ガスタービンに、国家プロジェクトとして実施した「1700℃級ガスタービン技術開発」の成果である高温化技術を適用し、タービン入口温度1600℃を実現している。これまで、全世界で累計45基のJ形ガスタービンを受注しており、そのうちアジア向けは、韓国向けの17基を含め33基、ガスタービンの成長市場である北米向けには12基を納入予定である。

特に韓国市場は重要で、韓国の国内で約130基の発電用ガスタービンが商用運転されているが、そのうち55基(42%)をMHPSが供給しており、最新鋭のJ形ガスタービンに代表される大型機市場では1位のシェアを誇る。同様にメキシコも重要な市場で、同国における発電設備容量の約40%をMHPSが占めている。

(2) 東芝

①技術開発動向

東芝は米国のゼネラルエレクトリック社(GE)と製造協業契約し、より高効率なGTCCであるH System TMに取り組んでいる。H System TMとは、ガスタービン動翼入口温

度を世界最高水準である 1500℃級とした一軸型コンバインドサイクル発電システムで、ガスタービン第 1,2 段動静翼の冷却を従来の空気冷却方式ではなく回収式蒸気冷却方式を採用することにより二酸化炭素排出量は従来型 LNG 火力に比べ約 25%削減、そして、世界最高レベルの熱効率を達成し低発電コスト、優れた環境性能に優れたシステムを実現している。

②海外への事業展開状況

東芝と GE は、1982 年から GTCC に関して協力関係にあり、2011 年 10 月からは、50Hz および 60Hz の地域に向けて、世界最高レベルの高効率なシステムについて、グローバルな販売協力体制を構築し、本格的な商業販売を進めている。また、2013 年 10 月には、さらなる関係強化に向け、GTCC の共同企画やマーケティングをはじめ、機器の信頼性や品質向上、次世代の GTCC の開発に向けた戦略的提携関係を構築することで合意しており、2014 年 4 月、北海道電力（株）から、石狩湾新港発電所の 1 号機 LNG 火力発電設備向けに、GE の新型ガスタービン 9HA と東芝製最新鋭蒸気タービン・発電機を組み合わせたガスタービンコンバインドサイクル発電システム (GTCC) を受注した（戦略的提携契約の締結後初の案件）。東芝と GE は、本受注を契機に、今後も協力関係を維持・強化し、さらに高効率で、NOX や CO₂ の排出が少なく環境負荷の低い GTCC をグローバルに提案していくことで、火力発電事業の拡大を目指すとしている。

(3) IHI

①技術開発動向

IHI は、GE との協力の下、ガスタービン発電プラントおよび発電機パッケージを国内外に供給している。中でも IHI のハイエンドモデル LM6000 シリーズは、GE 製のジェット機用エンジンの転用形のガスタービンで、世界最高クラスの発電効率（コンバインドサイクル 50%超）を誇り、航空エンジン技術により急速起動停止が可能、大型、産業型ガスタービンと比べ短期間での納入が可能などの特徴を持つ。

②海外への事業展開状況

直近では 2016 年 2 月に、住友商事とともにモザンビーク電力公社向け、ガス焼きコンバインドサイクル火力発電所建設工事を受注しており、これまでの日本および東南アジアを中心とした海外に多数のガスタービン、石炭焼きボイラ、LNG 関連施設の納入実績や、得られた技術ノウハウを生かして、高効率・高品質で環境性能にも優れたエネルギーシステムをアフリカ市場にも展開している。

(4) 川崎重工

①技術開発動向

川崎重工は、発電端出力 1,500kW から 30,000kW クラスまでのコージェネレーションシステムをラインナップしており、当該ガスタービンは自社で開発・設計・製作している。国産ガスタービンのコージェネレーション国内第 1 号機の実績とともに、国内外で

700台を越える圧倒的な実績を誇る。

一方、コンバインドサイクル発電プラントの中核となるガスタービンに関しては、個々の案件に応じて主要ガスタービンメーカーの優れた製品群の中から最も適切なものを選択し、それぞれのプラントの要求仕様に柔軟に対応した発電設備を設計、建設しており、特に、高炉ガス等の副生ガスの使用に際しては、供給されるガス条件の変動に対して高い追従性を有する燃料供給設備及びガスタービンの中核とした発電設備を提供が可能である。

②海外への事業展開状況

川崎重工は、温暖化対策の一環として、オープンサイクルで運転しているガスタービン発電設備に排熱回収ボイラと蒸気タービンを追設して、コンバインド発電設備に転換（アドオンまたはリパワーリング、ボトミングとも呼ばれる）することにより、発電効率の改善はもとより、ガスタービンからの排熱を利用する事によるCO₂削減を提案している。特に、多数の日系企業が進出しており、また、成長市場として期待される東南アジアでの販売拡大を進めている。なお、東南・西南アジアのほか、欧州、米国、日本を含むアジア極東地域においても現地販売拠点を活用し、世界4極体制にてガスタービン事業を積極的に展開している。

(5) 富士電機

富士電機は自社開発のガスタービンを持っておらず、国内ではドイツのシーメンスと連携して、シーメンスの最新鋭ガスタービンと富士電機の蒸気タービン、発電機を採用したコンバインド発電設備を国内では売り込んでいる。

6. CCS, CCU

6.1. CCS

(1) 開発・導入の必要性

CO₂ 排出量の大幅な削減は地球温暖化防止のために欠かせないこととなっている。国際エネルギー機関（IEA）が2014年6月に発表した「エネルギー技術展望（ETP）2014」では、地球の平均温度の上昇を2℃以内に抑制するために、2050年に世界のCO₂排出量をBAUケースの55Gt/年から15Gtに抑制し、すなわち40Gt/年を削減する必要があると指摘している。こうした中で、CO₂の回収・貯留（CCS）は革新的なCO₂削減技術として、2050年までの累積で14%、2050年時点では17%のCO₂削減量が必要となっている。IEAは、技術的選択肢からCCSを排除すると、2050年までに電力部門だけで約3兆米ドルまで投資コストが増加すると推定している。電力部門以外では、エネルギー・システムの完全な脱炭素化はCCSなしに実現する可能性は低いとも指摘している。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第5次評価報告書の第3作業部会（WG3）報告書「気候変動の緩和」（2015年3月）、2℃以内の抑制目標に整合した大気濃度450ppmCO₂換算に達するシナリオには、再生可能エネルギー、原子力エネルギー及びCCS付き化石エネルギー等からのエネルギー供給の割合を、2050年までに2010年の3倍から4倍近くに増加させている。同報告書におけるほとんどのモデルでは、CCS無しでは、2100年までに450ppmCO₂濃度に到達できないと指摘している。

日本政府は2010年6月に、エネルギー基本計画を策定し、火力発電の高度化を実現する手段の1つとして、2020年頃のCCSの商用化を目指した技術開発の加速化を図るとしている。また、同年10月に、地球温暖化対策基本法案においては、革新的な技術開発の促進として、第19条では、「二酸化炭素の回収及び貯蔵に関連する革新的な技術・貯留・利用技術（CCS、CCU）等の開発とその他の地球温暖化の防止及び地球温暖化への適応に資する技術の開発及び普及の促進のために必要な施策を講ずるものとする」と定めた。

さらに、エネルギー基本計画（2014年4月改訂）では、第3章では、「エネルギーの需給に関する長期的、総合的かつ計画的に講ずべき施策」の第5節では「化石燃料の効率的・安定的な利用のための環境の整備」において、高効率石炭・LNG火力発電の有効活用の促進として、2020年頃の二酸化炭素回収貯留（CCS）技術の実用化を目指した研究開発や、CCSの商用化の目途等も考慮しつつできるだけ早期のCCS Ready・導入に向けた検討を行うとしている。2016年5月に策定された「地球温暖化対策計画」でも、二酸化炭素回収・貯留（CCS）について、2030年以降を見据えて、「東京電力の火力電源入札に関する関係局長級会議取りまとめ」や「エネルギー基本計画」等を踏まえて取り組むとしている。

(2) 国内の技術開発動向

< 苫小牧実証実験 >

日本国内における大規模実証試験は、苫小牧地点において実施されている。

苫小牧での実証試験の決定については⁷³、実地調査と国の検討会などが行われた結果、全国115ヶ所の候補地点から絞り込まれ、2012年2月に苫小牧が選定された経緯がある。苫小牧が選定された理由としては、CCS実証試験を行うのに必要な環境として、二酸化炭素を貯留するのに適した地層やその地層に関するデータが存在すること、近隣に二酸化炭素の大規模な排出源(工場・発電所など)が存在すること等があげられる。

苫小牧実証試験委託先は「日本CCS調査株式会社」であり、経済産業省・平成24年度二酸化炭素削減技術実証試験事業(国庫債務負担行為に係るもの)、経済産業省・平成28年度二酸化炭素削減技術実証試験事業として支援を受けている。

日本CCS調査株式会社の構成会社として以下の通りである。

○電力(11社)：北海道電力(株)、東北電力(株)、東京電力(株)、北陸電力(株)、中部電力(株)、関西電力(株)、中国電力(株)、四国電力(株)、九州電力(株)、沖縄電力(株)、電源開発(株)

○石油(6社)：出光興産(株)、コスモ石油(株)、昭和シェル石油(株)、(株)ジャパンエナジー、新日本石油(株)、アラビア石油(株)

○鉄鋼(2社)：住友金属(株)、JFEスチール(株)

○エンジニアリング(5社)：新日鐵エンジニアリング(株)、千代田化工建設(株)、東洋エンジニアリング(株)、日揮(株)、JFEエンジニアリング(株)

○石油開発(2社)：石油資源開発(株)、国際石油開発帝石(株)

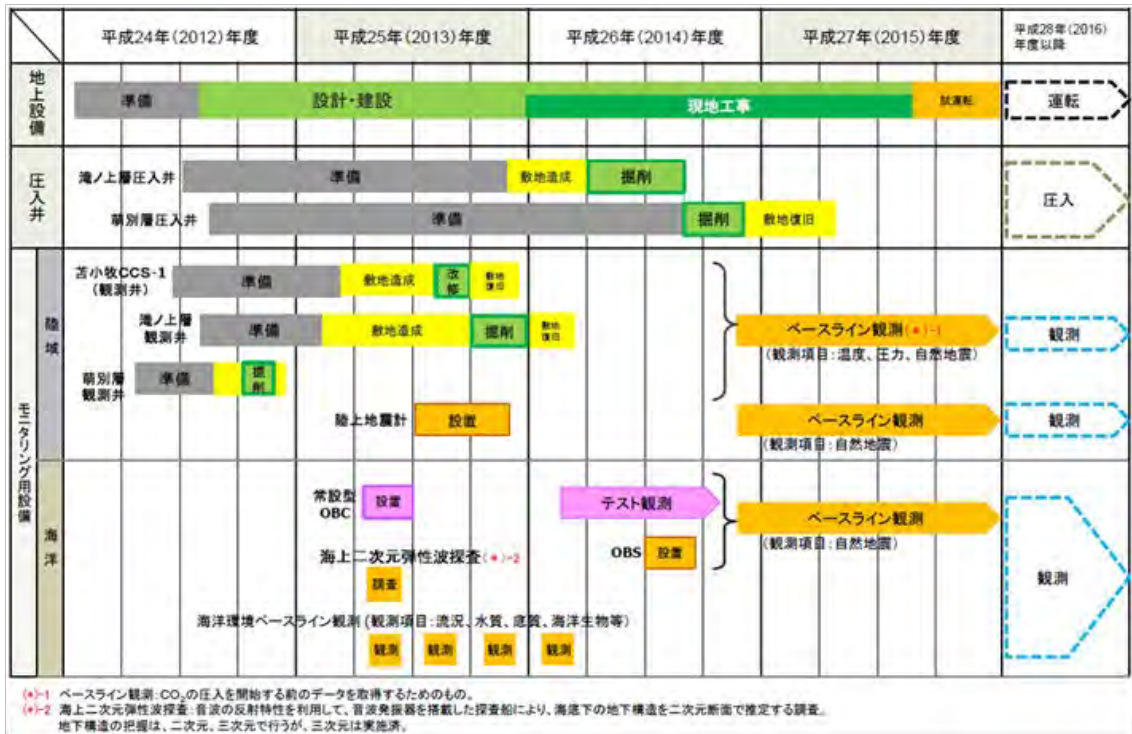
○化学(1社)：三菱瓦斯化学(株)

○セメント(1社)：三菱マテリアル(株)

○商社(1社)：三菱商事(株)

⁷³ 苫小牧市 HP: <http://www.city.tomakomai.hokkaido.jp/kigyoritchi/ccs/ccsnogaiyo.html>

図 44 苫小牧での実証試験のスケジュール



出所) 苫小牧市 HP : <http://www.city.tomakomai.hokkaido.jp>

日本 CCS 調査株式会社の広報によれば、苫小牧での実証試験はスケジュール通りに進められているようで、CO₂ 注入が 2016 年 4 月 6 から開始し、5 月 24 日までの累積 CO₂ 注入量は 7,162.9 トンとなっている。

<国内実証実験のスケジュール>

苫小牧実験に先立ち、RITE は経済産業省の委託事業により、CCS の安全性・信頼性の構築に必要な基盤技術として、帯水層貯留における CO₂ 圧入サイトの貯留性能評価、貯留層内の CO₂ 挙動解析および貯留層外部への CO₂ 移行(漏出)解析に係る技術開発を進める一環として、長岡 CO₂ 圧入実証試験を 2003 年~2006 年までに行った。

これらの実証実験を経て、2020 年に発電所や工場等の 100 万トン規模の CCS プロジェクトを開始する予定となっている。

図 45 日本のにおける CCS プロジェクトの開発計画

要素 \ 区分	長岡 CO ₂ 圧入実証試験 2003-2006年圧入 合計1万トン規模	苫小牧 大規模実証試験 2016-2018年圧入予定 10万トン/年以上	実用化段階で想定される CCSプロジェクト 2020年以降 100万トン/年規模
排出源	(市販のCO ₂ を利用)	製油所	発電所、工場等
分離・回収		化学吸収法	化学吸収法、膜分離法等
輸送		分離・回収箇所直近から CO ₂ 圧入	パイプライン、タンクローリー、 船舶等
貯留	陸域 帯水層 (構造的)	海底下 帯水層 (構造的/非構造的)	海底下/陸域 帯水層 (構造的/非構造的) 生産終了油・ガス層
圧入	1坑井	2坑井	複数の坑井
CO ₂ 挙動把握のための 主要モニタリング手法	観測井 3坑	弾性波探査 観測井 3坑	弾性波探査 観測井 複数坑

出所) 経済産業省資料：日本における CCS 実用化への取組み状況——苫小牧 C C S 大規模実証試験——

<国内実証実験の一覧>

Global CCS 研究所によると、日本国内では以下の CCS プロジェクトが進められている。

表 13 国内 CCS プロジェクト一覧

状態	プロジェクト	参加者等
操業	COURSE50 プロジェクト ⁷⁴	NEDO、RITE、大学等 6 つの機関が参画。 製鉄所高炉ガスの CO ₂ 排出削減を目指して化学吸収法と物理吸収法の技術を実証研究 事業期間：2008～2012 年度と 2013～2017 年度の 2 期
操業	三川発電所 CCS プロジェクト ⁷⁵	東芝が参画。 福岡・三川発電所で石炭火力から CO ₂ の排出削減にアミン酸ベースの化学吸収法を実験。燃焼後分離方式を採用。分離能力は 1 日 10 トン。 実験は 2009 年 9 月から 2015 年 8 月まで実施され、延べ稼働時間は 8,680 時、そのうち 2,800 時が連続運転。
操業 ※	長岡圧入プロジェクト ⁷⁶	RITE が参画。 日本初のモニタリングつきの CO ₂ 圧入パイロットプロジェクト

⁷⁴ RITE 報告書： http://www.rite.or.jp/results/today/pdf/RT2014_kagaku_j.pdf

⁷⁵ 東芝 HP： http://www.toshiba.co.jp/tech/review/2013/11/68_11pdf/a06.pdf

⁷⁶ <https://www.rite.or.jp/Japanese/project/tityu/nagaoka.html>

		ト。長岡市南西部の帝国石油・南長岡ガス田が実験場。深度約1,100mの砂岩（層厚約60m）に圧入実験。3つの観測井でモニタリング。 (2003年6月2005年1月まで10,400t-CO ₂ が圧入)。
建設中	大崎クールジェンプロジェクト ⁷⁷	大崎クールジェンが参画。 中国電力・広島大崎発電所構内で高効率発電IGFCとCCS技術を組み合わせた実証実験。第1段階酸素吹石炭ガス化複合発電実証試験設備（酸素吹IGCC、166MW）を建設し、2016年度実証試験運転を開始。第2段階酸素吹IGCCにCO ₂ 分離・回収装置を追設。第3段階燃料電池を組み合わせ、CO ₂ 分離・回収型IGFCを実証 (2012年度より土木工事開始、2018年度に経済性評価との計画)
建設中	佐賀市「清掃工場バイオマスエネルギー利活用促進事業」CCUプロジェクト ⁷⁸	東芝が参画 東芝は佐賀市の清掃工場バイオマスエネルギー利活用促進事業にCO ₂ 分離改修設備（アミン水溶液による化学吸収法）を提供。廃棄物発電施設容量は4,500kW、1日あたり最大10tのCO ₂ 回収が可能。回収したCO ₂ はアスタキサンチン生産のための藻類培養プラントに利用。日本発の廃棄物発電施設からのCCU実証プロジェクト。 (2016年9月16日稼働)
操業	苫小牧実証	日本CCS調査株式会社（28社で形成）が参画。 CO ₂ 分離から貯蔵まで実証を行うプロジェクト。CO ₂ 貯留に適した地層であることとその地層データが存在すること、近隣にCO ₂ の大規模な排出源（工場・発電所など）の存在することなどで苫小牧が選定。2016年から3年間の圧入実験（年10万トン）後2年間のモニタリングが計画されている。2020年に発電所や工場等の100万トン規模のCCSプロジェクトを開始する計画。

※モニタリング中

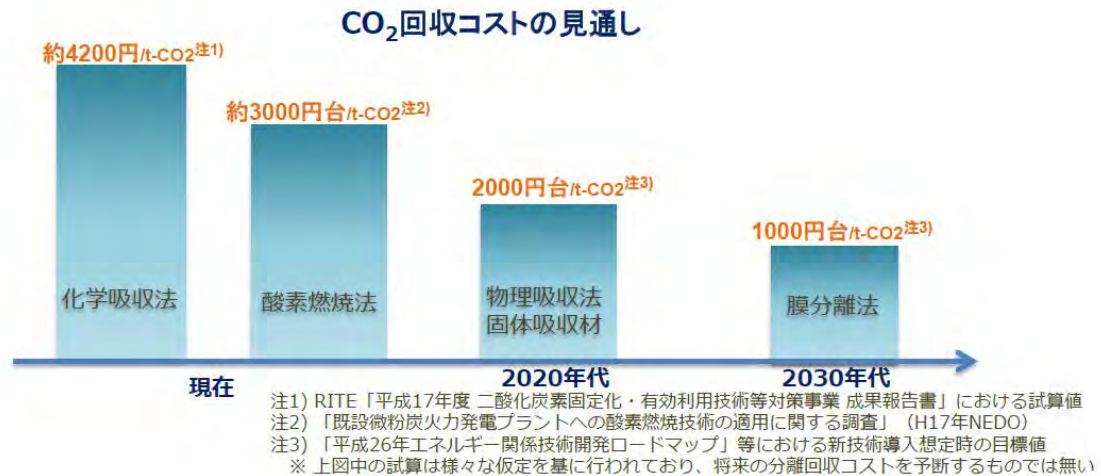
出所)各種資料による整理

⁷⁷ 大崎クールジェンプロジェクト HP : <http://www.osaki-coolgen.jp/project/>

⁷⁸ <http://www.newenergy-news.com/?p=5555>

＜CCS コスト＞

CCS のコストについては、経済産業省の資料によると、CCS の分離技術のコストは 2030 年に現在の 1/4 の 1000 円台/tCO₂ にする目標となっている。また、分離技術は CCS 全体コストに 60%以上を占めていると言われている。



出所) CO₂ 回収、利用に関する今後の技術開発の課題と方向性、資源エネルギー庁平成 27 年 6 月次世代火力発電協議会（第 2 回会合）資料 1

(参考) 2030年頃までに技術確立が見込まれるCO₂回収関連技術



出所) CO₂ 回収、利用に関する今後の技術開発の課題と方向性、資源エネルギー庁平成 27 年 6 月次世代火力発電協議会（第 2 回会合）資料 1 ⁷⁹

⁷⁹ http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/jisedai_karyoku/pdf/002_01_00.pdf

＜国内貯留ポテンシャル＞

日本の貯留ポテンシャルとして、廃油ガス田では2～3億トン貯留可能量があり、貯留地点としては有効と考えられる。

表 14 国内 CCS 貯留量

名称	構造位置	貯留可能量 (飽和率 50%) (百万トン)
磐城沖ガス田	福島沖	277
阿賀沖油ガス田	新潟沖	239
頸城油ガス田	新潟陸上	338

出所) 経済産業省資料「CCSの現状について」⁸⁰

(3) 主な国内企業

＜国内外プロジェクトへの参画動向＞

Global CCS 研究所の報告⁸¹によれば、日本の企業は、政府や電力会社などと連携して CCS に関する開発投資を進めており、それらの企業は多くは、Global CCS Institute に加盟し、そのネットワークを通じて海外との連携を深めることを期待していると思われる。

日本の CCS 関連活動開発投資は3つの業界が進んでおり、それらの進出の順番として、まずエンジニアリング会社が先行し、電機業界が続ぎ、次に石油ガス事業が続くとされている。現在、関係企業が各々の分野で開発を継続している。具体的には、

- 1) 石油ガス事業で CO₂ 回収・輸送・貯留に実績のあるエンジニアリング会社として、日揮、千代田化工、東洋エンジニアリング他がある。これらの企業は CO₂ 回収技術を産業分野（化学肥料プラント事業）にも展開している。
- 2) 電力事業では、主に CO₂ 回収技術に焦点をおいた電機メーカーとして、三菱重工業、日立（現、三菱日立パワーシステムズ）、IHI、東芝他がある。これらの企業は、自社資金や電力会社との共同研究により石炭焼きおよびガス焼きの排ガスからの CO₂ 回収技術を開発した。その過程では、圧力・温度スウィング法、化学吸収法および酸素燃焼法など多面的に開発を進め、その技術を蓄積している。
- 3) 製鉄関係では、新日鉄住金エンジニアリングが高炉ガスからの CO₂ 回収技術を開発している。
- 4) 貯留分野では、CCS に関心の高い建設会社には大成建設や鹿島建設などがある。この分野では、CO₂ の船舶輸送システムに必要な出荷基地・昇圧設備や、一時貯蔵タンクなどの設計検討を行っている。また、大深度地下での地下水流動や地盤応力変形の数値解析技術を生かし、CO₂ 地中貯留に関わる数値シミュレーションを多数実施している。

⁸⁰ http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs_kondankai/pdf/001_03_00.pdf

⁸¹ CCS 技術を蓄積して事業化に備える日本企業

<http://jp.globalccsinstitute.com/insights/authors/TerufumiKawasaki/2014/06/26/ccs%E6%8A%80%E8%A1%93%E3%82%92%E8%93%84%E7%A9%8D%E3%81%97%E3%81%A6%E4%BA%8B%E6%A5%AD%E5%8C%96%E3%81%A B%E5%82%99%E3%81%88%E3%82%8B%E6%97%A5%E6%9C%AC%E4%BC%81%E6%A5%AD>

また、関係企業は参画している国内外代表プロジェクトにおける活動上は以下に示す。

- 1) 苫小牧プロジェクト (CO₂ 処理量 10 万トン/年) には、日揮が石油精製施設内の水素製造プロセスからの CO₂ 回収を担当している。
- 2) 日本近海での海底下地中貯留を想定するシャトルシップ構想には千代田化工が中心的な役割を担っている。
- 3) 東洋エンジニアリングは、2013 年、ブラジルの洋上原油生産プラントにおける CCS 設備 (約 100 万トン/年) を完成させた。同社は、高压条件下での分離膜技術を使って CO₂ を回収し、更に高压 (500 気圧) の圧入技術を有している。
- 4) 火力発電所に関わる CO₂ 回収技術 (常圧条件) の開発では、東芝はその関連会社にある石炭火力発電所に CO₂ 回収試験設備 (化学吸収法、10 トン/日) を作り、JPOWER (電源開発) は IGCC 試験設備に CCS の回収試験設備 (化学吸収と物理吸収、24 トン/日) を設けて、試験を行っている。
- 5) 海外の大型実証プロジェクトへの取組として、三菱重工業が米国でサザンカンパニー社の回収試験設備 (化学吸収 500 トン/日) を担当し、日立 (現 三菱日立パワーシステムズ) はカナダでサスクパワー社の回収試験設備 (化学吸収 120 トン/日) を、そして IHI は豪州でカライドでの回収試験設備 (酸素燃焼 70 トン/日) を各々進めている。この分野では、各企業が積極的に自己投資を進め、それぞれ運転実績を蓄積し、その事業化レベルは Alstom や Shell などと並ぶ高い水準にあると思われる。
- 6) 貯留関係では、大成建設は CO₂ の地中挙動や周辺環境影響を評価するためのシミュレーション技術の開発を米国ローレンスバークレー研究所と協力して進め、豪州 ZeroGen や米国 WESTCARB などの海外プロジェクトで実績を積み、スーパーコンピューターを使った大規模計算技術は世界でもトップクラスにある。

Global CCS 研究所は、総じて日本の企業はこれまでの実績から、「すでにいつでも参入できる (ready-to-go) な状況にあると言える」としている。

また、経産省資料によれば、2013 年 5 月において、日本企業が主に参画している海外 CCS プロジェクトは以下となっている。これによると、三菱重工、JPower、IHI、三井物産、大阪ガス、東京ガス、中部電力、日揮、IHI、日立等企业が参加している。

表 15 海外CCSプロジェクトへの日本企業の参画状況

プロジェクト名	インサラ	バリー	バウンダリーダム	カライド	ゴルゴン	モングスタッド
場所	アルジェリア	米国 / アラバマ州	カナダ / サスカチュワン州 エステバン	豪州 / クイーンズランド州	豪州 / 西オーストラリア州	ルウェー / モングスタッド
事業主体	In Salah Gas (BP, Sonatrach, StatoilのJV)	Southern Company, 三菱重工	SaskPower	JV構成: CS Energy, Xstrata Coal, Schlumberger, J Power, IHI, 三井物産	JV構成: Chevron, Exxon Mobile, Shell, 大阪ガス, 東京ガス, 中部電力	Statoil
分類(貯留層)	帯水層	帯水層	帯水層or EOR	(生産停止ガス田)	帯水層	帯水層
CO2源 / 回収技術	天然ガス随伴 / 活性アミン法	石炭火力(25MWe相当分岐ガス) / 燃焼後回収法	石炭火力(110MWe) / 燃焼後回収法	石炭火力(30MWe) / 酸素燃焼法	天然ガス随伴 /	RCC※オフガス&天然ガス焚き熱電併給設備(280 MWe) / 燃焼後回収法
圧入量(計画)	1.0Mt/年	500t/日	1.0Mt/年	70t/日	3.4-4.0Mt/年	1.5Mt/年
圧入開始	2004年	2012年8月	2014年	2014年	2015年	2016年以降
現状	CO2圧入中 (累積圧入量:3.8Mt)	CO2圧入中	設備建設中	ボイラー運転開始 (2012年3月)	設備建設中	回収プロセス評価段階
日本企業: 技術的貢献	日揮 : CO2回収設備の設計・建設	三菱重工 : CO2回収設備の設計・建設	日立 : CCS対応蒸気タービンの設計・製作	IHI : 酸素燃焼ボイラーへの改造	日揮 : LNGプラントの設計・建設	三菱重工 : CO2回収設備入札(2013年6月)への応募資格獲得

出所) 経済産業省資料: CCSの現状について (2013年5月現在) ⁸²

<技術別主な国内企業の代表>

表 16 技術別国内企業の動向

企業	プロジェクト内容・実績等
吸収・アミン系吸収	
三菱重工	1) 松島発電所 2006年 10t/日 2) 米国 Barry 発電所 2011年 500t/日
東芝	三川発電所 2009年 10t/日
吸収・酸素燃焼法	
IHI (技術保有代表者)	三井物産、電源開発、豪州石炭協会、CS energy 社、Schlumberger 社、Glencore 社のジョイントベンチャープロジェクト。2012年よりクイーンズランド州の Callide A 発電所 4号機(石炭焚き、30MW)において酸素燃焼の実証運転を開始し、既に累計 4,600 時間の運転を達成している。プロジェクト予算は約 2.4 億ドルであり、CO2回収量は 75 トン/日(発電所からの CO2 発生量の約 11%)が計画されている。
吸収・化学ループ燃焼法	
一般財団法人 石炭エネルギー センター、産 業技術総合研 究所等	石炭ガス化を触媒により行うために、Ca 系のキャリアを使用したケミカルループ燃焼法が検討された。この事業は NEDO 事業の「ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト 次世代高効率石炭ガス化技術開発(平成 19年度～平成 23年度)」の中で実施された。
東京ガス	2020年までに、ケミカルループ燃焼技術を確立し、天然ガスなどの化石燃焼から CO2 を低コストに回収すると共に、エネルギー(熱、電気)と物質(二

⁸² http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs_kondankai/pdf/001_03_00.pdf

	酸化炭素、窒素、水素)を同時に生み出す「コプロダクションシステム」の実現を目指している。神奈川工科大学と共同研究を行っている。
輸送・パイプライン製造	
新日鉄住金株式会社	CO ₂ や硫化水素(H ₂ S)が含まれる環境で使用可能なステンレス鋼シームレスラインパイプの開発が行われている。
JFE スチール株式会社	パイプライン用鋼材で多くの国外導入実績を有している。州 Chevron、米国 Jack&St.Malo、モザンビーク SASOL、ノルウェー STATOIL 等
輸送・パイプライン建設	
日鉄住金パイプライン&エンジニアリング株式会社	新日鉄住金グループのパイプライン事業のうち、日本国内のパイプライン事業を担っている。
JFE エンジニアリング株式会社	国外導入実績を有している
東洋エンジニアリング株式会社	国外導入実績を有している
輸送・船舶輸送	
三菱重工業	2004年、IEAのGreenhouse Gas R&D ProgrammeのもとでCO ₂ の船舶輸送に関する検討を行っている。
財団法人エンジニアリング振興協会	NEDOが平成22年度に実施した「革新的ゼロエミッション石炭ガス化発電プロジェクト 発電からCO ₂ 貯留までのトータルシステムのフィジビリティ・スタディー CO ₂ 輸送システムの概念設計」参画
千代田化工建設	新しい船舶輸送方法であるシャトル船・洋上圧入方式に取り組んでいる。

出所) 環境省委託報告書：<https://www.env.go.jp/earth/ccs/attach/mat03.pdf>

(4) 他国の主な研究開発動向

<全体の動向>

2015年現在では、世界合計15のCCSプロジェクトが稼働している。2016年に4プロジェクト、2017年に7プロジェクトが稼働する予定となっている。現在計画中のプロジェクトを含むと合計40のCCSプロジェクトが将来的に稼働することとなり、合計のCO2貯留量は4,000万トンCO2となる。対して、IEAの450ppmシナリオでは2040年までに4億トンのCCS貯留量が必要となされている。

また、地域的には現行主として北米・欧州が主導しているが、今後は中国が顕著に増加する見通しである。

表 17 世界のCCSプロジェクトの状況

	Early planning	Advanced planning	Construction	Operation	Total
North America 北米	1	1	5	10	17
China 中国	4	4	-	-	8
Europe 欧州	3	1	-	2	6
Gulf Cooperation Council	-	-	1	1	2
Rest of World その他	4	-	1	2	7
Total	12	6	7	15	40

出所)The global Status of CCS(2015)VOLUME 2 PROJECTS, POLICY AND MARKETS

表 18 世界のCCSプロジェクト（稼働中）

プロジェクト名	貯留タイプ	国	CO ₂ 量/ 年 万 t	運転 開始	排出源	輸送距離 km
Val Verde Natural Gas Plants	EOR	米国	130	1972	天然ガス 精製	356
Enid Fertilizer CO ₂ -EOR Project	EOR	米国	70	1982	肥料生産	225
Shute Creek Gas Processing Facility	EOR	米国	700	1986	天然ガス 精製	460
Century Plant	EOR	米国	840	2010	天然ガス 精製	255
Lost Cabin Gas Plant	EOR	米国	90	2013	天然ガス 精製	374
Air Products Steam Methane Reformer EOR Project	EOR	米国	100	2013	水素製造	158
Coffeyville Gasification Plant	EOR	米国	100	2013	肥料生産	110
KEMPER COUNTY ENERGY FACILITY	<u>EOR</u>	米国	350	2015		
Great Plains Synfuel Plant and Weyburn-Midale Project 2)	EOR	カナダ	300	2000	合成天然 ガス	329
Boundary Dam Integrated Carbon Capture and Sequestration Demonstration Project	EOR	カナダ	100	2014	発電所	66
Petrobras Lula Oil Field CCS Project	EOR	ブラジル	70	2013	天然ガス 精製	N/A
Sleipner CO ₂ Injection 2)	海底下 塩水層	ノルウェー	90	1996	天然ガス 精製	N/A
Snøhvit CO ₂ Injection 2)	海底下 塩水層	ノルウェー	60 – 80	2008	天然ガス 精製	153
In Salah CO ₂ Storage 2) 3)	陸上 塩 水層	アルジェリ ア	100 (圧入 中断中)	2004	天然ガス 精製	14
Saudi Arabian Oi	EOR	サウジアラ ビア	80	2015		85

1) この一覧表は、石炭火力の場合、80万トン/年以上、ガス火力および産業プラントの場合は40万トン/年以上のCO₂を回収貯留を対象としている。

2) 4件のプロジェクトでは貯留CO₂のモニタリングが実施されているとされ、IEAなどはこの4件をCCSプロジェクトとみなすことが多い。

3) In Slaha プロジェクトは2011年6月から操業を停止している

出所) 経産省資料⁸³と GCCSI⁸⁴による加工

RITE は、操業中のほとんどのプロジェクトが、天然ガス処理の業種で、かつ貯留形態が EOR であることを指摘している。天然ガス処理の場合は、CCS の有無にかかわらず CO₂ を分離するため、増分費用は輸送及び貯留に限定され、EOR の場合は回収した CO₂ を販売するなど事業性があると指摘している⁸⁵。Global CCS 研究所も EOR 以外のプロジェクトが事業性に乏しいと指摘している。

< 欧州の動向⁸⁶ >

1) CCS 指令の要点と関連動向

欧州の CCS 指令は CO₂ の地中貯留を対象とする。ただ指令の中では、大規模施設（定格電気出力 300MW 以上）を新設する事業者に対して、適切な貯留サイトの有無、輸送設備の技術的・経済的な実現可能性、CO₂ 回収施設の追加設置（レトロフィット）が技術的・経済的に実現可能かを評価することを求めることが明示された。これにより、CCS の設置を検討することが必要となった。なお指令は、2015 年に見直しを行うことも定めており、要求事項が強化される可能性もある。

2) EU の CCS に対する公的支援とその動向

2007 年 3 月の欧州理事会では、最大 12 件の実証プロジェクトの建設・運用に向けた促進メカニズムの確立を承認したが、実証プロジェクトに対する最初の具体的な支援策は、2008 年の経済危機の際に経済復興の一環として設けられた「欧州エネルギー復興プログラム（EEPR : European Energy Programme for Recovery）」である。もう一つの支援策は、EU-ETS の排出権 3 億 EUA 分のオークション収入を補助金として CCS などに振り向ける「NER300（New Entrant Reserve 300）」である。このほか研究開発支援では、EU の研究開発支援の柱であるフレームワーク・プログラム（FP）で CCS 関連の研究プロジェクトに補助を提供している。

表 19 EEPR の支援を受けた CCS 実証プロジェクト

国	場所	プロジェクトの内容	補助金金額 (€)
ドイツ	Jänschwalde	既存の発電所での酸素燃焼法と燃焼後回収の実証。2 つの代替貯留・輸送を分析する。	1 億 8,000 万
オランダ	Rotterdam	設置容量 250MW 相当の CCS で、技術は燃焼後回収。回収した CO ₂ は、CCS 施設から約 25km 離れた海底枯渇ガス田に貯留。CO ₂ 輸送・貯蔵インフラ	1 億 8,000 万

⁸³ CCS の動向

http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/005/pdf/005_08.pdf

⁸⁴ THE GLOBAL STATUS OF CCS | 2015

⁸⁵ RITE、http://www.rite.or.jp/results/today/pdf/RT2015_kikaku_j.pdf。Global CCS 研究所

⁸⁶ 石油エネルギー技術センター http://www.pecj.or.jp/japanese/minireport/pdf/H25_2013/2013-005.pdf

		ラ開発を目指す。Rotterdam Climate Initiative の一環。	
ポーランド	Belchatow	欧州最大の石炭（褐炭）火力発電所（4440MW）に設置。発電容量 250MW に相当する燃焼排ガスから回収。3 カ所の塩水帯水層の貯留サイトを開発。	1 億 8,000 万
スペイン	Compostilla	酸素燃焼法と流動床技術を使用。30MWの試験プラントの後、2015 年 12 月までに 320MW を超える実証プラントを設置。100km 離れた塩水帯水層に貯留の見込み。	1 億 8,000 万
英国	Hatfield (Don Valley)	IGCC 発電所（900MW）の新設に伴い CCS 設置。175km 離れた海底ガス田に貯留の見込み。Yorkshire 地域の CO2 輸送・貯留インフラ開発の一環。	1 億 8,000 万
イタリア	Porte Tolle	石炭火力発電所(660MW)の新設に伴い CCS を設置。250MW の発電容量に対応。200km 離れた海底の塩水帯水層に貯留の見込み。	1 億

出所) 石油エネルギー技術センター⁸⁷

3) 欧州における CCS の技術開発と実証試験動向

EU では前述のように EEPR で CCS の実証プロジェクトに補助金を提供したが、支援対象プロジェクトの実施が遅れているうえ対象プロジェクトが中止となったケースもある。また NER300 では CCS への支援が見送られており、EU 全体では実証試験が当初の予定よりも遅れ、米国などとの差が広がっている。

4) CCS の導入予測

欧州委員会が 2011 年に発表した「エネルギーロードマップ 2050」では、エネルギーの需要や発電容量などの予測と併せて、2050 年までの CCS の導入予測も出している。欧州委員会は複数のシナリオを設定して予測しているが、下表のように 2020 年以降に商業規模の導入が始まり、CCS を備えた発電施設が相当量の割合を占めるようになるのは 2040 年以降としている。2050 年の時点では最も高い割合のシナリオの場合で 48.3%となる。また 2050 年では、ガス火力発電のうち最大のシナリオで 65～66%、石炭火力発電では最大のシナリオで 63%が CCS を備えると予測している。

⁸⁷ http://www.pecj.or.jp/japanese/minireport/pdf/H25_2013/2013-005.pdf

表 20 欧州の火力発電容量に占める CCS の割合の予測 (2015～2050 年)

シナリオ	上段 発電容量(MW)、下段 CCS の割合(%)				
	2015 年	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年
1: 現行政策のまま	523,122 0	495,127 0.5	486,617 0.6	529,582 4.1	600,885 6.4
2: 政策による高い省エネ率の達成	514,498 0	479,676 0.6	425,271 0.6	408,232 14.5	381,921 39
3: 多様な技術(再生可能エネルギー、CCS、原発)	517,222 0	485,201 0.6	445,495 0.8	464,169 20.4	438,539 43.9
4: 再生可能エネルギーが高い割合	514,758 0	482,548 0.6	444,095 0.6	426,999 5.2	429,416 12.2
5: CCS の開発・普及・遅延	516,631 0	484,851 0.5	444,327 0.6	423,549 8.9	418,700 35.3
6: 原発計画の縮小	516,541 0	485,612 0.6	464,599 1.8	516,844 25	512,830 48.3

出所) 石油エネルギー技術センター

注: 発電容量は火力発電のみを示した。火力発電の発電容量には石炭、ガス、石油、バイオマスの核燃料と地熱、及び CHP を含む。

一次出所: “Energy Roadmap 2050 - Commission Staff Working Paper - Impact Assessment” SEC (2011) 1565 final, Brussels, 15.12.2011⁸⁸

<アメリカ大陸の動向>

アメリカ大陸地域は、プロジェクト開発の重要な実現要因である石油増進回収 (EOR) を伴う炭素回収貯留/炭素回収、利用および貯留 (CCS/CCUS) の開発と展開において、世界をリードしている。

1) プロジェクトの現状

世界の大規模 CCS プロジェクト 54 件の半数がアメリカ大陸で進められている (米国 19、カナダ 7、ブラジル 1)。運用中または建設中のプロジェクト 22 件のうち、16 件はアメリカ大陸にある。

●運用中または建設中の世界の大規模 CCS 発電プロジェクト 3 件はすべて北米で実施されている。

カナダのサスカチュワン州バウンダリー・ダム統合炭素回収隔離実証プロジェクト (年間 100 万トン) は 2014 年 10 月に運用を開始。

米国ミシシッピ州ディカルブ市のケンパー郡エネルギー施設 (年間 300 万トン) と米国テキサス州ヒューストン南部のペトラノヴァ炭素回収プロジェクト (年間 140 万トン) は、双方とも、2016 年からの運用見込まれている。

⁸⁸ http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/doc/roadmap2050_ia_20120430_en.pdf

●2015年には、北米で3件の工業プロジェクトの運用開始が予定されている。

カナダのアルバータ州のクレスト（炭素回収能力年間108万トン）

米国イリノイ州ディケーターのイリノイ州工業CCS（年間100万トン）

カナダのアルバータ州のアグリウムCO₂ストリームを伴うアルバータ炭素基幹線（ACTL）（年間30～60万トン）

これらのプロジェクトの範囲は、さまざまな工業分野（エタノール、オイルサンド精製、肥料生産）にわたっている。クレストとイリノイ州工業CCSプロジェクトはまた、同地域初の地下の塩水層にCO₂を貯留する実用可能な大規模CCSプロジェクトである。

●ブラジルにはペトロプラス・ルラ油田CCUSプロジェクト（年間70万トン）がある。リオデジャネイロ沖300キロに位置するこのプロジェクトは、世界で唯一のオフショアCO₂-EORプロジェクトである。ペトロプラスは2020年までに、サントス盆地に新しい浮体式生産設備を20基導入する予定であり、その多くにはCO₂貯留目的のためのCO₂/ガス再圧入が含まれる。

●メキシコはCCUSプロジェクトの開発基盤を構築するために多大な努力を始めた。同国のCCUS技術ロードマップでは、パイロット・プロジェクトとデモンストレーション・プロジェクトの実施、そして最終的には商業規模のプロジェクトにつながる主要な5つの段階をメキシコ政府が確認している。世界銀行も、メキシコのCCUS能力構築の取組みのいくつかを支援している。

2) 政策と規制環境

CO₂-EORは、アメリカ大陸におけるCCUS展開にとって主要な経済的牽引力である。現在の政策、法律、規制環境の多くが、連邦や州の両方、または地域レベルでの既存の石油・ガス規制にCCUSを組み入れることに注力している。

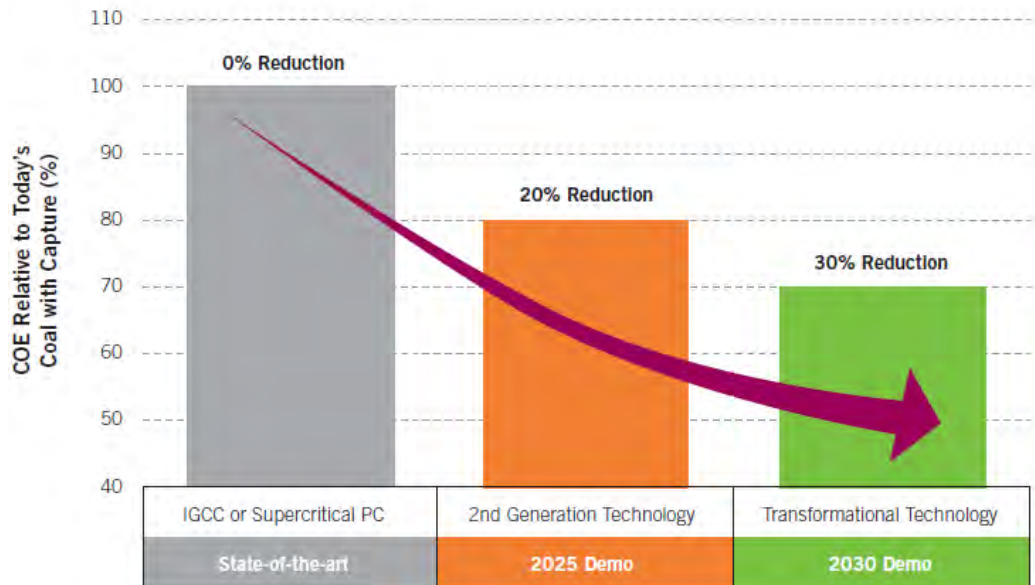
CCSに関する米連邦の活動は、米国環境保護庁（EPA）がオバマ大統領による気候変動行動計画推進案を主導するのに伴い、規制環境に注力してきた。EPAは新規および既存の天然ガス・石炭火力発電所の両方から排出されるCO₂に対処するための規制案を発表した。

米国とカナダ政府の連邦助成金が北米に所在する多数の大規模CCSプロジェクトの開発を支援してきた。米国エネルギー省も、CCUS技術に関する広範なR&Dプログラムを支援している。

2015年7月1日に施行されるカナダ政府の排出削減政策では、石炭火力発電所が排出するCO₂の量が制限されることになる。カナダ政府は、温室効果ガスの排出削減目標を設定し、石油・ガス部門の堅実なCCS規制基盤をさらに固めるために、連邦・州CCSネットワークを通じて地域と協力している。

CCUSは、メキシコの低排出戦略の一部として認定されている。エネルギー省（SENER）の主導の下、メキシコは、2014年初めにCCUS技術ロードマップを公表し、現在はCCS規制枠組みの見直しを行っている最中である。

表 21 US DOE による第二世代及び革新的 CO2 回収技術の相対的費用削減目標と時期



<http://hub-member.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/196843/global-status-ccs-2015-summary.pdf>

<技術動向>

1) 回収技術

回収技術の開発は、新技術の小規模試験と既存技術の実証という段階から、大幅なコスト削減技術を目指したパイロット規模の試験へとその中心が移行し始めている。

パイロット試験は、モジュラー回収システムを商業的に導入する契機となる可能性がある。これにより、工業化による信頼性と品質改善、初期コストの削減、規制の変化に応じた回収設備の柔軟な変更、といった利点がもたらされる。

革新的な回収技術に関する研究開発も進行している。複数技術の相乗効果により単一技術では成し得なかったコスト削減・効率改善をもたらすハイブリッド技術も含まれる。

大規模回収設備の実証において著しい進展が見られるが、特に発電部門における継続的な進展が期待されている。カナダ、SaskPower 社の Boundary Dam CCS 実証プロジェクトは、CO2 回収設備を備えた世界初の商業規模発電所であり、2014 年に操業を開始した。米国、ミシシッピ州 Kemper 郡 IGCC プロジェクト及びテキサス州 Petra Nova 炭素回収プロジェクトは 2016 年の操業開始が予定されており、他にも世界各地において複数のプロジェクトが進行している。これら注目を集めるプロジェクトから得られた知識によって、将来の CO2 回収設備の設計・建設・運営コストの削減へ向けた貴重な情報が得られる。

回収技術の将来に目を向けると、一層のコスト削減を実現するための研究開発に注力すべきことは明らかである。コスト削減に焦点を当てた複数の技術が開発途上にある。様々な次世代技術が小規模試験を終えており、2025 年の実証試験へ向けたパイロット試験が進行中である。こうした状況は、よりコスト効率の良い回収技術を発展させるために重要である。現在パイロット試験が実施されている回収技術は、低コスト実証へ向けた候補技術と見られており、最終

的には広く普及する可能性がある。

発電の3つの分離形態：

燃焼後回収：排ガス中からCO₂とN₂を分離し、CO₂を圧縮。

燃焼前回収：水素(H₂)と一酸化炭素(CO)の合成ガスに水性ガスシフト反応でCOの大半をCO₂に変換して分離。

酸素燃焼：空気中のN₂とO₂を分離して燃焼後の排ガスはCO₂と水が主成分で、容易に分離。

表 22 分離のためのエネルギー損失

	SCPC	NGCC	IGCC	酸素燃焼
発電量の減少 (%)	20～25	15～20	20～25	15～20

出所) 世界の CCS の動向: 2015 GCCSI

注) SCPC: 超臨界微粉炭、NGCC: 天然ガス複合サイクル、IGCC: 石炭ガス化複合サイクル

第二世代・第三世代技術の開発は、溶剤、固体吸着剤、膜を中心に進められている。

2013年、米国DOEは第二世代・第三世代技術の一般的な開発スケジュールについて分析を行い、第二世代技術に関する研究室規模の開発は間もなく完了する見込みで、小規模なパイロット試験は2020年代初めまで継続される予定、大規模パイロット試験は開始されたばかりである。また、第三世代技術は、研究室規模の試験は、2020年代初頭の数年間に亘り継続され、特定技術の小規模パイロット試験は、2010年代の後半に開始される可能性がある。大規模パイロット試験は、2020年代を通じて実施され、2030年以降の実証が予定されている。

2) 輸送技術

CO₂パイプラインの輸送技術は確立しており、CO₂輸送インフラの発注・建設が続いている。現行のR&D作業はコスト削減が中心である。CO₂輸送に関する国際規格の策定が進んでいる。

3) 貯留技術

温室効果ガス削減目標に沿ったCCSの商業的展開を支えるのに十分な貯留資源が世界の主要地域に存在しているが、資源のレベル評価の実施と特徴付けデータの入手可能性は地域間によって違いが大きい。

表 23 アメリカ大陸地域の主要国貯留資源量

国名	評価範囲	推定資源量 (Gt)	資源水準	注記
米国	全体	1,800 ~ 20,000	有効値	US DOE 方式
カナダ	全体	44 ~ 310	有効値	US DOE 方式
メキシコ	部分的	100	理論値	深部塩水層のみ評価

出所) 同上

表 24 欧州における特定の多国間資源評価の概要

プロジェクト	報告年度	対象国	推定総資源量 (Gt) (深部塩水層と枯渇 田の合計)
CO2StoP143	2014	EU 27 か国	不明*
Geocapacity144	2009	EU 23 か国	120**
Bastor2145	2014	バルト海諸国 (ロシア とポーランドを含む)	16
NORDICCS146 147	2015***	ノルディック 5 か国	68****

出所) 同上

注) 注: 報告された数値はすべて 2 桁まで有効。

* 一部の国のデータが制限されているため、総資源量は不明

** 控えめな見積

*** 最終的な地図は、本概要の作成時点で未発行

**** スウェーデン、デンマーク、ノルウェー (一部) の深部塩水層の暫定合計見積 (41 Gt)

表 25 アジア開発銀行による理論上の推定貯留資源量

国名	推定貯留資源量 (Gt)	
	深部塩水層	油田・ガス田
インドネシア - 南スマトラ盆地	7.7	0.9
フィリピン	23	0.3
タイ	8.9	1.4
ベトナム	10	1.3

出所) 同上

注) 注: 報告された数値はすべて 2 桁まで有効。

表 26 アジア太平洋地域の国別貯留評価の進捗状況

国名	評価範囲	推定資源量 (Gt)	資源水準	注記
オーストラリア	全体的	33 ~ 230	有効値	修正 US DOE 方式
中国	部分的	3,000	理論値	Brennan and Burruss 方式
インド	限定的	47 ~ 140	理論値	Wildenborg方式
日本	全体的	150	有効値	有効な深部塩水層、油田、ガス田を含む
韓国	部分的	100	理論値	

注) 全体的：ほとんど、またはすべての潜在的な貯留盆地を対象とし、同時に実施される有効資源の計算を含めた総合評価（公開済み地図を含む）。

部分的：広域的な有効資源の計算を含まない国家規模の調査/地図、あるいは州/地方/盆地規模の地図・詳細評価に基づく部分的評価。

限定的：選択した盆地またはサイトの関連調査を含む、より限定的な調査。

出所) 同上

<新しい貯留の可能性—玄武岩による鉱物炭酸化貯留>

鉱物炭酸化では、CO₂ が金属酸化物含有物質と反応し、炭酸塩と二酸化ケイ素などの固体副産物が生成する。天然のケイ酸塩鉱物やアルカリ性の産業廃棄物が金属酸化物含有物質として使用できる。生成した鉱物炭酸化は、安定した固体で地質学的な時間尺度での貯留能力がある。さらに、すべての化石燃料資源の燃焼により生じる CO₂ を固定できるほど、ケイ酸マグネシウムとケイ酸カルシウムは、十分に存在する。1t の CO₂ を固定化するにはおよそ 1.6-3.7t の岩石を要する。はまだ開発段階であり、実施の準備はできていない。これまで調査された最良の事例は、天然のかんらん石の湿式炭酸化であり、これには貯留した CO₂ 1t 当たり 50-100US\$ の費用がかかり、元の発電所に対する 30-50% のエネルギーペナルティに相当する。CO₂ 回収プラントにおいても 10-40% のエネルギーペナルティを占める場合、鉱物炭酸化を行う完全な CCS システムは、同等の出力を持つ CCS を行わない発電所より 60-180% 多くエネルギーを必要とする。⁸⁹

こうした CCS 貯留方法は、2016 年 6 月に米コロンビア大学とアイスランドの CarbFix プロジェクトで大成功したと報じられた。アイスランドのヘリシェイデイ発電所は CO₂ を世界初となる岩石に変換する試みは、CO₂ を玄武岩に吸収させてから硬い岩石に変成するが、予想以上にその速度が速いことがわかった。

CO₂ が溶け込んだ水を玄武岩と接触させると化学反応を起こし、CO₂ が白い石上の物資として沈殿することを見出した。この時点では反応は遅く 95% の CO₂ が沈殿するのに 2 年を要したが、原理的には CO₂ を石化して回収することが可能であることが確認された。

⁸⁹ IPCC 報告書 <https://hub.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/114681/carbon-dioxide-capture-and-storage-report-japanese.pdf>

アイスランドでのパイロットプロジェクトの一環として火山岩に注入された大気中の二酸化炭素が、注入後2年以内にほぼ完全に鉱物化し炭酸塩鉱物に変換されることが確認された。この新しい研究結果は、大気中から回収した二酸化炭素を貯留するための吸収源として、玄武岩が有効となる可能性があることを示唆している。大気中二酸化炭素を地下深くの岩盤に注入することで隔離することができることが知られている。温室効果ガスである二酸化炭素を炭酸塩鉱物に変換するためにはカルシウム、マグネシウム、および鉄に富んだ珪酸塩鉱物が必要であるが、これまではこのような珪酸塩鉱物が乏しい岩盤への注入しか主として行われてこなかった。そのため、二酸化炭素の漏出リスクが生じている。一方で、最大で重量比25%のカルシウム、マグネシウム、および鉄を含んでいて、地球上で最も一般的な岩の一種である玄武岩に二酸化炭素を注入することも可能である。

アイスランドで行われた今回のパイロットプロジェクト「CarbFix」では、玄武岩質溶岩を貫通する深さ400mから800mの穴に二酸化炭素を注入した。Juerg Matterと共同研究者らは、二酸化炭素と共に注入したトレーサーを利用し、ほとんどの二酸化炭素が注入後2年以内に鉱物化したことをつきとめた、と説明している。炭酸塩鉱物は安定した物質であり、今回の手法による二酸化炭素漏出のリスクは比較的低いため、玄武岩の貯留サイトの監視の必要性は大幅に低減されるだろう、と著者らは語っている。また、この技術の基盤は多孔質の玄武岩と水で、どちらも大陸縁片部において世界中の多くの箇所が存在しており、大規模化は可能である、とも著者らは語っている⁹⁰。

⁹⁰ <http://www.trendswatcher.net/03-2016/science/co2%E3%82%92%E7%9F%B3%E3%81%AB%E5%A4%89%E3%81%88%E3%81%A6%E5%9C%B0%E7%90%83%E3%81%AB%E6%88%BB%E3%81%99carbfix%E3%83%97%E3%83%AD%E3%82%B8%E3%82%A7%E3%82%AF%E3%83%88/>

6.2 CCU

CCUは、回収したCO₂を有価物の製造に利用する技術であり、現在、複数の分野で技術開発が進められている。CCSと比較した場合、現時点ではCO₂の大規模処理が困難であるものの、有価物の製造につながる点でコスト性に優れ、今後の技術革新によりCO₂の処理能力、有価物の製造効率が向上すれば将来の利用拡大が期待される。

現状では、CO₂利用には石油増進回収(EOR)、工業利用(溶接、飲料用など)、農業利用(施設園芸におけるCO₂施用)などの用途がある。また、CO₂を有機化学品に変換するための研究開発も行われている。現状でCCUとして実用化されている技術はEOR、尿素増産などごく一部の用途に限られているが、幅広い分野において新たなCO₂利用の研究開発、実用化が進展している。

1) CCUの産業利用

CCUの産業利用の潜在規模は最大100Mt-CO₂/年と推定されている。ただし、その大半は固定期間の短い尿素利用となっている。

二酸化炭素は、例えば尿素などの化学製品の製造、冷凍システム、食品包装のための不活性剤、飲料、溶接システム、消火器、水処理プロセス、園芸、製紙業の沈降炭酸カルシウム、その他多くの小規模な用途など、多数の利用法がある有益な産業用ガスである。現在、大規模の利用は石油増進回収法となっている。

商業用のCO₂回収源の多くは、合成肥料、水素プラント、エチルアルコール生産からの排出されている。これらのCO₂は化学的または物理的な溶剤洗浄システムを用いて回収される。炭酸ナトリウムの製造に使うような石灰窯や、クラフトパルプ製造工程からも生成する。

米国、イタリア、ノルウェー、日本など世界の一部の地域では、CO₂は天然のCO₂井戸から抽出されている。またCO₂は、不純物としてCO₂を含むことの多い未加工の天然ガスの生産・処理の過程でも回収される。

回収された全CO₂のうちかなりの割合が、主に尿素やメタノールなど商業的意義のある化学薬品を作り出すため、製造時点で使用される。他の商業用途のため回収されたCO₂は、精製、液化され、通常20bar、-18°Cで液体の状態で納品・貯留されることが多い。

表は、現在CO₂を使用している主要な化学又は工業用途の、世界的な生産率とCO₂使用率を示す(石油増進回収法は除外)。貯留された炭素がCO₂に分解され大気に放出されるまでのおおよその寿命を併せて示す。その数値は、様々な化学製品の製造やその他の用途に使用されるCO₂のうち、表の最終列に示す期間が過ぎても貯留されている割合がゼロになることを意味する。

表 27 CO₂ の産業用途 (M トン規模の製品または用途のみ)

化学製品の分類または用途	年次市場規模 (Mt yr ⁻¹)	製品Mtごとに使用される CO ₂ の量(MtCO ₂)	CO ₂ 排出源	寿命 ^b
尿素	90	65	産業	6ヵ月
メタノール(COへの添加剤)	24	<8	産業	6ヵ月
無機炭酸塩	8	3	産業、天然	数十年から数世紀
有機炭酸塩	2.6	0.2	産業、天然	数十年から数世紀
ポリウレタン	10	<10	産業、天然	数十年から数世紀
テクノロジー面	10	10	産業、天然	数日から数年
食物	8	8	産業、天然	数ヶ月から数年

注 a 天然の排出源には地下井戸と発酵が含まれる。

b 使用された CO₂ のうち、示された期間が過ぎても貯留されている割合がゼロになる。

出所) IPCC : 二酸化炭素回収・貯留に関する IPCC 特別報告書 (日本語版)

2) 有機化学薬品と高分子化合物

化学薬品および高分子化合物の製造のため、CO₂を一酸化炭素・メタン・メタノールなど他の C₁ 成分の代用品として使用する新しいプロセス経路の候補が多数検討されてきた。炭素が高度に酸化された状態の不活性ガスである CO₂ を使用するには、効率的な触媒システムの開発と、CO₂還元のための追加エネルギーの使用を必要とする。これまでに検討されてきた化学薬品として、ポリウレタンとポリカーボネートがある。その場合の検討動機は、CO₂の貯め場を見つけるためというより主として、極度の毒性を持つホスゲンの使用を避けるためであった。提案されたプロセスは、ホスゲンをベースとする現在の経路より全体的なエネルギー消費を低くでき、そのため更なる CO₂ 排出量の軽減につながる。現在の世界のポリカーボネート消費量は、約 2.7Mt/年である。すべてのポリカーボネート製造を CO₂ ベースのプロセスに転換したなら、CO₂ の直接消費量は約 0.6MtCO₂/年となる。現在公表されているデータからは定量化が困難ではあるが、プロセスでのエネルギー/材料の変化により CO₂ がある程度削減される。

同様に、ポリウレタンの全製造を変換すれば、直接 CO₂ 消費量は約 2.7MtCO₂/年になるだろう。ただし、CO₂ ベースによる製造の商業的適用については、ほとんど進展は報告されていない。前述した CO₂ ベースによる製造の商業的適用は、大気中に放出された人為起源 CO₂ のうち非常に少ない割合にしか直接影響を及ぼさない。炭化水素資源で利用できたエネルギーは CO₂ 原料になると無くなってしまい、それをプロセス効率の改善によって補償できない限り追加エネルギー供給とそれに関連する CO₂ 排出で補わなければならない。そのため、CO₂ の正味貯留は一層小さくなるか、逆にマイナスになる可能性もある。

3) 二酸化炭素を用いた燃料製造

例えばガソリンやメタノールなど、炭素ベースの液体燃料は、その高エネルギー密度と使いやすさ (それは一部には十分確立されたインフラストラクチャに基づくものだが) のため、魅力的な存在である。CO₂ は、エネルギーを追加することにより、炭素ベースの燃料を製造する原料となり得る可能性がある。エネルギーは保存されるので、元になっているエネルギー源が化石炭素である限り、CO₂ 排出量の正味削減となることはない。一次的エネルギー源からのエネルギー単位が一定量の CO₂ を生み出すなら、CO₂ から燃料を製造することは CO₂ の再利用であるが、変換に必要なエネルギーを提供するためほぼ同等量の CO₂ を放出している。この

変換プロセスは必ずエネルギー損失を伴うので、燃料合成の間に生じる CO₂ の合計量は、変換される CO₂ を越える傾向があり、変換された CO₂ もいったん消費されると排出される。

CO₂ からの炭素ベース液体燃料の製造は、元となるエネルギーインフラストラクチャが化石エネルギーに基づかない場合のみ、CO₂ の排出量を削減する。例えば、水素と CO₂ をガソリンまたはメタノールの製造のための原料として用い、輸送部門を水素へ転換させてしまうのではなく、またガソリンまたはメタノールを使うこともできる。水素は、水力・原子力・太陽光エネルギー・風力エネルギーを用いて水から作り出す。化石燃料を用いた発電が存続する限り、この変換に CO₂ は利用できる。あるいは、生物学的・化学的手段を用いて大気中から CO₂ を回収し、閉鎖循環を作り上げることも可能だろう。そのような循環は水素経済がそうであるように、安くてクリーンで豊富な非化石エネルギーが入手できるか否かにかかっている。

4) バイオマスによる CO₂ 回収

燃料のバイオマス生産も、CO₂ からの燃料生成のカテゴリーに分類される。光合成の助けを借りて、太陽光エネルギーは水と CO₂ をでんぷんなどの強力な有機化合物に変換することができる。それらの有機化合物を、今度はメタン、メタノール、水素、バイオディーゼルなどの産業用燃料に変換できる。また、自然環境や農業環境、または発電所から出るオフガスに含まれる高濃度 CO₂ と、CO₂ を有益な化学薬品に変換する微細藻類を養う産業環境で、バイオマスは生産できる。生物学的プロセスは自らの CO₂ を収集するので、実は CO₂ 回収を行っていると言える。バイオマスを有効に使用するなら、バイオマスも炭素をその活発な状態に戻すことによってリサイクルしている。バイオマス生産は、新世代のバイオマスベースの炭素質の燃料を生成するので、化石燃料の必要性を減少させる。CO₂ の回収テクノロジーとしては、バイオマス生産は最終的には、光を化学的に蓄えられたエネルギーに変換する効率によって制限を受ける。現在、農業バイオマス生産における太陽光エネルギー変換効率は通常 1% 未満である。微細藻類の生産は、光子利用効率を、太陽エネルギー 1 単位あたりの化学エネルギーの比率に変換すると、1-2% のわずかに高い率で行われている。従って、微細藻類が発電所の CO₂ 出力を回収するため必要とされる太陽光エネルギー収集量は、発電所の電力出力より約 100 倍大きい。平均 200W/m² の太陽光照射で、100MW の発電所はほぼ 50km² 程度の太陽光収集面積を必要とする。

微細藻類の培養には、広大な土地に加え、CO₂、温水、栄養(窒素、リン等)が必要であるが、日本国内としては、これらを火力発電所、下水処理場等から調達することで、CO₂ の処理と同時に、国産燃料の生産など、多様な目的を実現することが可能。

微細藻類の研究開発については、様々な藻類の種類で研究開発が行われており、今後大規模化による大量生産が期待されている。福島では復興の観点から土着の藻類を利用した燃料生産に関するラボレベルでの研究開発がなされている。

図 46 微細藻類研究動向

主要事業者	I H I	J-POWER	DENSO	D I C
共同実施者	ちとせ研究所・神戸大	東京農工大・日揮	中央大・クボタ・出光興産	神戸大・基礎生物学研究所
微細藻株	ポトリオコッカス 油分(炭化水素)を体外分泌し、保持する特徴を有する藻。増殖能力の高い株を獲得済みであり、更なる改良も実施。 	珪藻 海洋珪藻。オイル成分の分布がシンプル。細胞の付着性がない。自己凝集性がある。 	シュードココミクサ 日本国内の温泉から発見された藻類。酸性条件下で生育可能であり、野外培養に有利。 	クラミドモナス 海産性モデル緑藻の <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> の近縁種 
目的代替油	ジェット燃料	ジェット燃料	ジェット燃料・ディーゼル	ジェット燃料
開発段階	応用研究 ～ 商用実証へ 鹿児島市に国内最大級(1500㎡)屋外培養設備を構築し、プレ実証試験を開始 	基礎～応用研究(中期) 大型培養槽(円型10㎡、20基:福岡県)により、藻類の連続培養試験を実施中 	基礎～応用研究(中期) 60㎡培養槽(レースウェイ型:愛知県)における、藻類の試験培養を実施中 	基礎～応用研究(中期) 25㎡屋外レースウェイ培養槽を設置し(米国)、屋外培養を実施中 
研究開発の概要	屋外大規模培養実証を実施中 商用スケールに向けた課題抽出 海外での培養適性評価試験の実施 発電所等の排CO2の有効利用検討 等	屋外培養条件の確立、育種 屋外における半連続培養等の最適化 遺伝子組換えによる育種技術の確立 耐冷性株併用による通年培養の検討	屋外培養条件の確立、育種 屋外における培養条件の最適化 遺伝子組換え株の商用利用手法確立 藻の省エネ、低コスト回収技術開発	屋外培養条件の確立、育種 屋外における培養条件の最適化 遺伝子組換えによる育種技術確立 代謝解析による油分向上技術検討
研究開発支援状況	24年度からNEDO事業(戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業)にて実施。	25年度からNEDO事業(戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業)にて実施。	23年度からNEDO事業(戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業)にて実施(中央大と)。25年度から別のNEDO事業実施(中央大、クボタ、出光興産と)	24年度からNEDO事業(戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業)にて実施。

出所) CO2回収、利用に関する今後の技術開発の課題と方向性、資源エネルギー庁平成27年6月次世代火力発電協議会(第2回会合)資料1

http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/jisedai_karyoku/pdf/002_01_00.pdf

人工光合成は中長期的な観点から重要となる環境技術として注目されている。現在、主に以下の企業と機関で研究開発が進められている

日本：パナソニック、東芝、豊田中央研究所、人工光合成化学プロセス技術研究組合(ARPCem)等

米国：Joint Center For Artification Photosynthesis (JCAP)等

その他：EU FP7、スウェーデンコンソーシアム、韓国人工光合成センター等

日本では、経済産業省が約150億円を投入、米国エネルギー省はJCAPに100億円以上投入しているほか、オバマ大統領が2011年の一般教書演説で言及するなど各国で国家プロジェクトとして開発が進んでいる。

エネルギー変換効率では、ARPCemが2.2%(世界最高)、東芝が1.5%を実現するなど、日本勢が世界をリード、ただし実用化には10%程度の効率を実現する必要がある。

ARPCemが2021年に、パナソニックが2020年に実証実験を開始する意向を表明している。

<米国のCCUプロジェクト>

表 28 米国 DOE における CCU プロジェクト

Project Name	Performer	Funding Source
Beneficial Use of Carbon Dioxide in Precast Concrete Production	McGill University	セメントブロック製造
Chemical Fixation of CO ₂ to Acrylates Using Low-Valent Molybdenum Sources	Brown University	アクリレートへの化学固定
Conversion of CO ₂ in Commercial Materials using Carbon Feedstocks	RTI International	化学反応 10 \$ /tCO ₂ 以下目標
High Efficiency Solar-based Catalytic Structure for CO ₂ Reforming	PhosphorTech Corporation	人口光合成
Integrated Electrochemical Processes for CO ₂ Capture and Conversion to Commodity Chemicals	Massachusetts Institute of Technology	電気化学プロセスによる化学製品へ
Utilization of CO ₂ in High Performance Building and Infrastructure Products	CCS Materials, Inc.	セメント製造

出所) 米 DOE

<http://www.netl.doe.gov/research/coal/carbon-storage/research-and-development/co2-utilization>

米国 DOE の CCU のコスト目標は 10 ドル/t-CO₂⁹¹

<CCU 関連企業>

CCU はまだ研究室で研究開発が行われている段階にあり、大学、産業界と政府が連携して取り組んでいる状況にある。以下、主要な大学と企業の一覧である。

⁹¹ 出所) Carbon Capture program goal of converting CO₂ into a useful product at a net cost of less than \$10 per metric ton.

出所) <http://www.netl.doe.gov/File%20Library/Research/Coal/carbon%20capture/FE0004329.pdf>

表 29 CCU 関連大学と企業

大学	企業	CCU用途
燃料利用		
Sandia National Laboratory, US	Mantra Energy Venture, Canada	
University of California, US	Carbon Recycling International,	
Pennsylvania State University, US	Iceland	
Chuo University (RE)	Denso (RE)	シュードココミクサ
	Kubota (RE)	
	Idemitsu Kosan (RE)	
Keio University (RE)	JX Nippon Oil & Energy (RE)	ユーグレナ
	Euglena (RE)	
	Hitachi (RE)	
Kobe University (RE)	IHI (RE)	ポトリオコッカス
Kobe University (RE)	DIC (RE)	クラミドモナス
Tokyo University of Agriculture and Technology (RE)	J-Power (RE)	珪藻
	JGC (RE)	
University of Miyazaki (RE)	Cosmo Oil (RE)	ラビリントラ
化学製品利用		
University of Sheffield, UK		
University of Aachen, Germany Massachusetts Institute of Technology, US	Bayer, Germany	ポリウレタン・ポリカーネート
	BASF, Germany	
	RWE, Germany	
	Siemens, Germany	
	Evonik, Germany	
Tokyo Metropolitan University, Prof. Dr. Inoue	Toshiba	一酸化炭素・エチレングレコール
Kyoto University, Institute for Integrated Cell-Material Sciences, Prof. Dr. Tanaka	Panasonic	メタン
Tokyo Institute of Technology	Toyota Central R&D Labs., Inc.	ギ酸
University of Tokyo		
Tokyo University of Science		
University of Toyama		
Kwansei Gakuin University		
Osaka City University		
Nagoya University		
University of Tokyo	Mitsubishi Chemical	

Kyoto University	Mitsui Chemicals	
Tokyo University of Science	TOTO	
Tokyo Institute of Technology	INPEX	
University of Toyama	Fujifilm	
	Sumitomo Chemical	
水素製造		
	JX (reforming)	
	Osaka Gas (reforming)	
	KOBELCO(reforming)	
	Asahi Kasei (electrolysis)	
	Toshiba (electrolysis)	
	Chiyoda (MCH)	
	Kawasaki Heavy Industry (Liquified H2)	

出所) 各種資料による整理

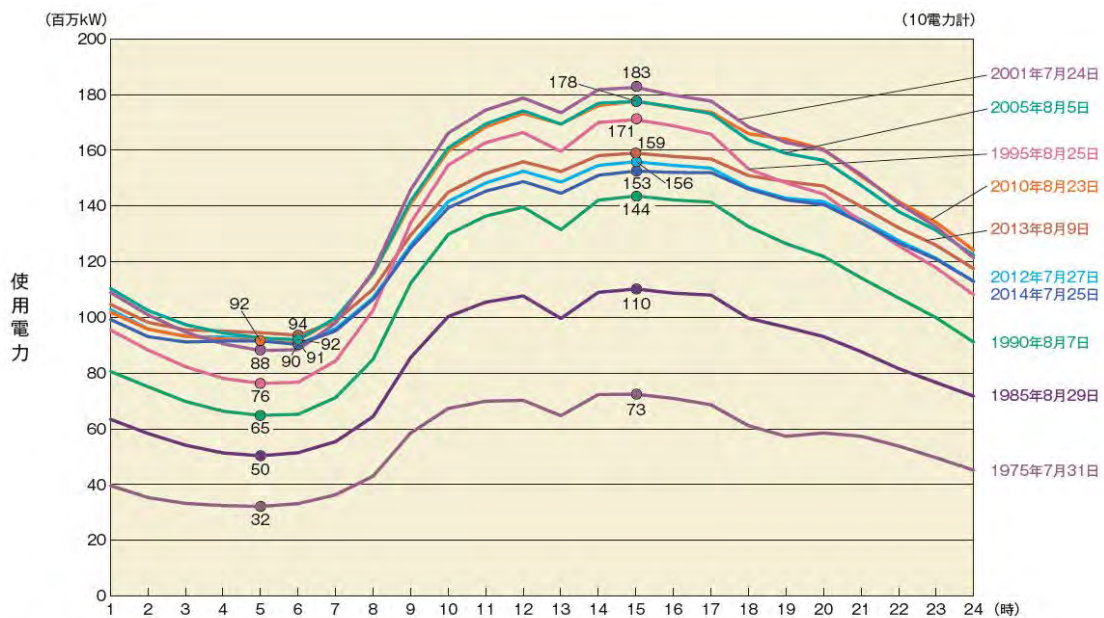
7. 蓄電池(系統用)

7.1. 開発・導入の必要性

(1) ピーク需要対策・電気代節約

基本的に1日の間の電力需要は図47のように、人々が活動する昼間に多く、逆に夜間には少なくなる。電力を十分に供給するためには、昼間の最も高い需要（ピーク）に対応できるだけの発電設備を建設する必要があるが、その場合夜間には発電能力が余ることになる。これに対し、蓄電池を効果的に活用することで、夜間の余剰電力を充電し、その電力を昼間に放電するといった対策が可能となる。これは換言すると図48のように昼間の電力需要ピークを擬似的に夜間に移行させることであり、ピークシフトと呼ばれる。これにより、必要な発電設備の量を最小限に抑え、無駄を省くことができる。また、一般的に電気代は需要が少ない夜間の方が安くなるため、各需要家レベルでは安価な夜間電力を昼間に用いることで、電気料金の節約というメリットを得ることもできる。

現在、主なピークシフトの手段としては、揚水発電によって、夜間の余剰電力で水をくみ上げ、昼間の需要ピーク時にその水を用いて発電するという手段に頼っている。これは現時点では揚水発電の方が安価であるため、コスト面さえ解決されれば、より立地制約が少なく、建設のリードタイムがより短い蓄電池の優位性が発揮される。たとえば、揚水発電の建設リードタイムは約15-20年であるのに対し、蓄電池は約1年で稼働可能である⁹²。



(注) 1975年のみ9電力計

図47 最大電力発生日における1日の電気の使われ方の推移

出典：日本原子力文化財団「原子力・エネルギー図面集」2016.

⁹² 経済産業省「蓄電池戦略」2012.

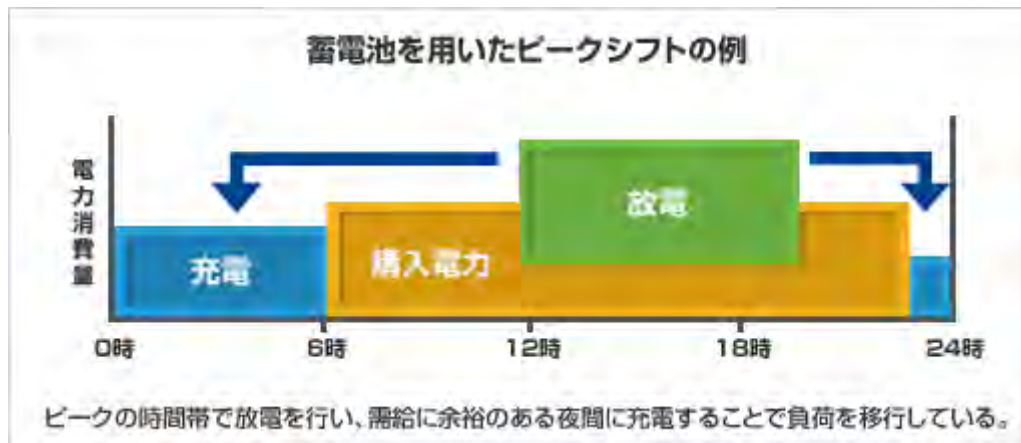


図 48 蓄電池を用いたピークシフトの例

出典：蓄電池バンクウェブサイト

(2) 系統安定化・再生可能エネルギー受入可能量増加

電力供給にあたっては電力系統全体で需要量と供給量を一致させる必要があり、その一致が崩れると電力の周波数も標準値⁹³から離れてしまう。この周波数の崩れが一定以上となると、停電や電力系統設備への損害、あるいは個々の電気機器や設備への損害を起こす恐れがある。そして電力需要量は刻一刻と変化し続ける⁹⁴ため、供給側ではそれに対して細やかな調整を行って系統の安定を維持しなければならない。こうした調整は電力会社によって、基本的には火力発電の出力調整や揚水発電の活用などによって行われてきたが、蓄電池も余剰電力の充電と電力不足時の放電を駆使することで図 50 のように周波数変動を抑制し、この役割を担うことができる。蓄電池のこの役割は今後、再生可能エネルギーの導入量増加に伴って、一層重要になってくる。

太陽光発電や風力発電といった再生可能エネルギーは自然条件によって発電量が大きく変動する電源であるため、その導入量が増えるほど、上記のような系統安定のための出力調整は困難となってくる。そして、日本では2012年に固定価格買取制度（Feed-in Tariff, FIT）が施行されて以降、特に太陽光発電の導入量が急増しており、その変動幅が従来の手法による系統安定化対策によってカバーできる範囲を超えてしまう懸念が各地で顕在化してきている。そのため、経済産業省によって定められた現在のルールによると、東京電力、中部電力、関西電力以外の電力会社7社の管区内では、各社が算定した「受入可能量（30日等出力制御枠）」を超えて系統に接続した太陽光・風力発電設備に対しては時間の上限なく無補償で出力抑制を行える⁹⁵こととされている。電力各社の「受入可能量（30日等出力制御枠）」と、各社の管区（簡易区分）における、FITによって認定を得た案件の累計設備容量、そしてそのうち既に導入された設備容量の2016年3月現在の状況は図 49 のようになっており、現在認定を受けている

⁹³ およそ富士川（静岡県）と糸魚川（新潟県）を境とし、東日本では50Hz、西日本では60Hz。

⁹⁴ 前項で述べたような昼間に需要量が伸びるといった大まかな変動のみならず、一分一秒単位でも細かな変化を続けている。

⁹⁵ 逆にいうと、このルールを受け入れる限りは系統に接続できるので、この「受入可能量（30日等出力制御枠）」接続量の上限を示したものではない。また、「受入可能量（30日等出力制御枠）」を超える前に接続された設備についても、年間30日もしくは360時間までは無補償での出力抑制が行われ得る。

案件が全て系統に接続し運転開始に至ると、多くの地域で「受入可能量(30日等出力制御枠)」を超過することになる。

このような状況に対し、蓄電池は図 50 のように変動電源の不安定な周波数を緩和する効果があるため、その導入は系統の調整余力を増強し、さらなる再生可能エネルギーの導入を可能とすることにつながる。

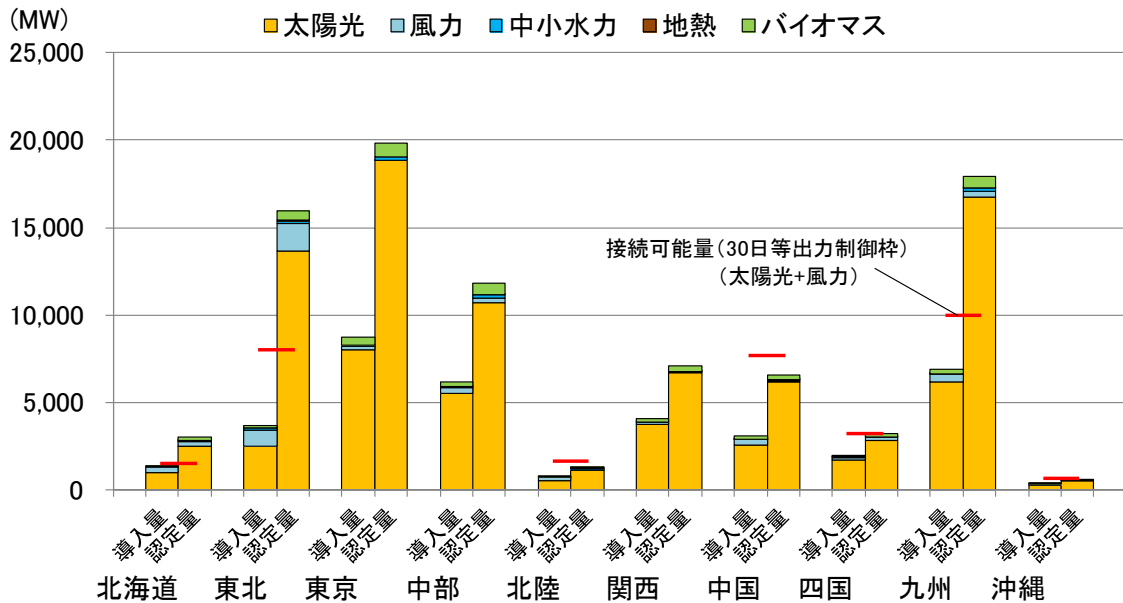


図 49 地域別 FIT 導入・認定容量および接続可能量 (30 日等出力制御枠)

注：ここでの地域区分は、県単位での各電力会社の供給エリア区分に準ずる。ただし、複数の電力会社の供給エリアにまたがる県については、そのなかで最も供給対象面積が広い電力会社の供給エリアとして算入した。このため、各社が公表している「接続可能量」の算定根拠と厳密には対応していない地域がある。

：東京電力、中部電力、関西電力は現時点では系統の受入余力が残っており、接続可能量は公表していない。

出典：(設備容量) 資源エネルギー庁, FIT 情報公開ウェブサイト

(接続可能量) 経済産業省, 系統ワーキンググループ (第 7 回) 公開資料

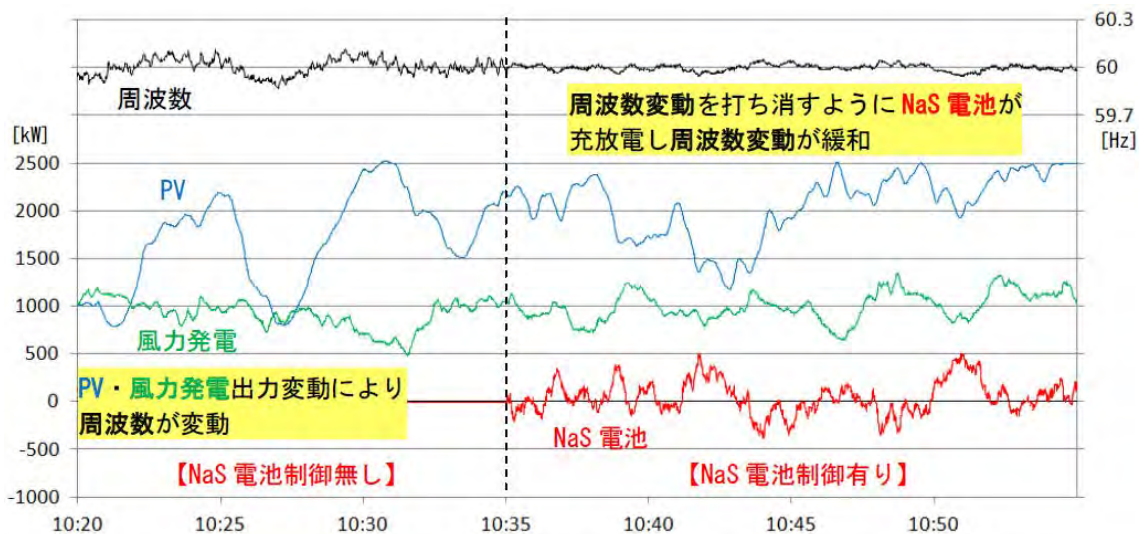


図 50 周波数変動抑制効果の検証事例

出典：2013 年 11 月 15 日付沖縄電力プレスリリース

(3) 電気自動車

電気自動車（Electric Vehicle, EV）はガソリンを燃焼させる従来の自動車とは異なり、蓄電池に充電した電力を用いて電動モータによって駆動する自動車である。前述の通り、蓄電池は安価な夜間電力を利用して充電できるため、ランニングコストはガソリン自動車と比較して低くなるとされている。また、減速時にエネルギーを回収できるため、エネルギー効率はガソリン自動車の3倍近くになる⁹⁶。自家用太陽光発電システムと併用することで、昼間の余剰電力を蓄電に充てることも可能となる。そして、ガソリン車を代替することにより、温室効果ガスの排出量を削減することにもなる。

ただし、電気自動車は現時点では、①一台当たりの価格が高いうえ、自宅にV2H（Vehicle to Home）と呼ばれるシステムも導入しなければならないため初期費用が高い、②また電気ステーションの設置など、社会全体での電気自動車普及に合わせたインフラ整備が進んでいない、ことなどから導入台数は多くはないため、今後の導入拡大を目指すのであれば、こうした問題の解消に向けた努力が必要となる。また、大規模なインフラ整備が必要となる関係上、低炭素自動車として電気自動車、燃料電池自動車、バイオ燃料自動車のいずれの普及を目指すのかを社会全体として明確に意図し、それに合わせた戦略を立案・実行していかなければならない。

(4) 現在の導入量および導入目標

現在の蓄電池は導入コストが高く、実用段階に入っているとは言い難い。特に系統用蓄電池に関しては、一部地域での実証試験の段階を出ていない。

2012年、経済産業省は「蓄電池戦略」を発表し、2020年に世界全体の蓄電池市場規模（20兆円）の5割のシェア（足下は18%のシェア）を日本企業およびその関連企業が獲得することを目指して掲げた。なお、その内訳については、大型蓄電池35%、定置用蓄電池25%、車載用蓄電池40%を想定している。

7.2. 国内の技術開発動向

(1) 電池種別ごとの開発動向

蓄電池には使用部材や構造などの違いによって様々な種類があり、

⁹⁶ 経済産業所ウェブサイトより

表 30 の通りそれぞれ異なる特性を持っている。また、その特性によって、図 51 ように様々な用途に用いられている。

表 30 各蓄電技術の比較

蓄電技術名	エネルギー密度 /出力密度	充放電 効率	サイクル 寿命	運用性	システム 価格
i) 鉛蓄電池	○/○	○	○	要均等化充電	◎
ii) NaS 電池	◎/△	◎	○	ヒータロス有	◎
iii) ニッケル水素電池	◎/○	○	◎	要均等化充電	○
iv) リチウムイオン電池	◎/○	◎	○	なし	△
v) パナジウムレドックス フロー電池	○/△	○	○	ポンプロス有	○
vi) 圧縮空気エネルギー貯蔵 (CAES)	◎/△	△	○	立地制約有	◎
vii) 揚水発電 (参考)	△/△	△	◎	立地制約有	◎

【凡例】◎：特に優れている ○：優れている △：やや劣る

出典：NEDO『NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版』2014, p.IX-29.

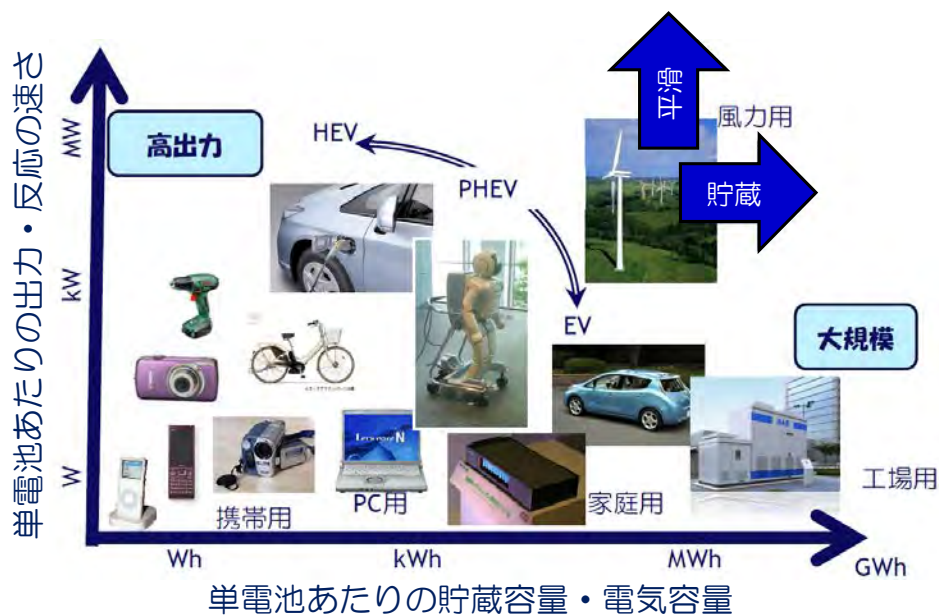


図 51 蓄電池システムの規模・出力とその用途

出典：池谷知彦「電力貯蔵の技術開発動向」第9回地球温暖化対策シンポジウム, 2015.

a. 鉛蓄電池

鉛蓄電池は負極に鉛 (Pb)、正極に二酸化鉛 (PbO₂)、電解液に希硫酸 (H₂SO₄) を用いた蓄電池 (二次電池) である。過充電に強く、出力が高い点、常温で広い温度範囲 (5-50℃) において動作する点が特徴である。また、価格も比較的安価であり、国内のリサイクル体制が確立している点も特徴として挙げられる。これらの特性から、既に幅広い用途で採用されており、豊富な実績を誇る。その一方で、充電状態 (State of Charge, SOC) が低い状態に置かれると電極の劣化が進行し、容量・入出力が低下する点、充放電エネルギー効率が他の電池に比べて低い点、蓄電システム内の電圧のばらつきを揃えるために商用電力による定期的な SOC リセット (均等化充電) が必要である点が課題となっている。近年では、サイクル特性に優れた電力

貯蔵用の長寿命制御弁式鉛蓄電池も実用化されている⁹⁷。

b. NAS 電池

NAS 電池は負極にナトリウム (Na)、正極に硫黄 (S) を用い、電解質として固体電解質 β -アルミナセラミックスを用いる。固体電解質 β -アルミナセラミックスのナトリウムイオン伝導を用いるため、作動温度を 300°C 程度に保つ熱が必要となる。高いエネルギー密度を持ち、大容量化と省スペース化が可能である点、レアアースを使わないため量産化によりコストダウンが可能である点、自己放電がなく、利用 SOC 範囲が広く、充放電エネルギー効率も高い点が特徴である。一方で、高温で動作する電池のため、運転開始時にはヒータによる加熱を行う。そのうえにナトリウムや硫黄といった危険物を使っているため、取り扱いや放熱の制御には注意が必要である点が課題である⁹⁸。実際、2011年9月には三菱マテリアル筑波製作所において、日本ガイシ製の電力貯蔵用 NAS 電池において火災事故が発生している⁹⁹。

c. ニッケル水素電池

ニッケル水素電池は負極活物質に金属水素化物、正極活物質にニッケル酸化物（オキシ水酸化ニッケル、NiOOH）を用い、電解液に水酸化カリウム (KOH) を主体とするアルカリ水溶液を用いた二次電池である。電極上での物質溶解や析出を伴わないので長寿命であり、高速充放電も可能な点が特徴である。さらに、危険物としての取り扱いが不要で設置上の制約が少ない点、有害金属を用いておらず、環境にやさしくリサイクルが容易である点もメリットである。一方で、自己放電が月あたり 30% と比較的大きい点、鉛蓄電池と同様に商用電力による定期的（週 1 回程度）な SOC リセットが必要である点、発熱に伴う適切な温度管理が必要である点が課題となっている。また、金属水素化物が高価であることがコストも問題となっている¹⁰⁰。

d. リチウムイオン電池

リチウムイオン電池は負極材にカーボン系材料、正極材にリチウム含有金属酸化物、電解液に有機電解液を用いた電池である。エネルギー密度および充放電効率が高く、自己放電が小さい点、電極上での金属析出を伴わないため長寿命である点、高速充放電が可能である点等が特徴である。これらの特性から、今日では携帯電話やノートパソコンをはじめとする電子機器から、スマートグリッドにおける蓄電設備用途まで、非常に幅広く用いられている。その一方で、有機電解液を用いており発火の危険性があるため安全対策が必要であるほか、過放電・過充電に弱く、高い SOC や高温下では電池の劣化が早まる点が課題である¹⁰¹。

e. レドックスフロー電池

レドックスフロー電池は、電池反応を行う流通型電解セル、活物質の溶液（電解液）を貯蔵する正負極のタンク、電解液をタンクからセルへと循環するためのポンプ、配管などから構成

⁹⁷ NEDO 『NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版』2014, p.IX-29-30.

⁹⁸ *Ibid.*, p.IX-31.

⁹⁹ 2011年10月28日付日本ガイシ プレスリリース

¹⁰⁰ NEDO (2014), *op. cit.*, p.32.

¹⁰¹ *Ibid.*, p.IX-34.

され、不活性電極の表面で活物質である2種類のレドックス系の酸化と還元が生じる反応を利用する。サイクル寿命が長く、不規則な充放電操作に左右されない点、セルとタンクを切り離れた柔軟な設置が可能な点、SOCを運転中に容易にモニタリングできる点が特徴である。また、ミリ秒オーダーの瞬時応答性があるため、瞬停対策にも利用可能である。一方、タンク部の占める体積が大きいためエネルギー密度が比較的小さい。また、電解液循環のためのポンプ動力が必要であり、電解液を通じて電流損失が生じる点が課題である。

f. ナトリウムイオン電池

リチウムイオン電池で利用されるリチウムはレアメタルであることから資源供給制約の課題がある。したがって、リチウムの代わりとして資源供給制約が非常に小さいナトリウムを利用した電池の研究開発が現在進められている。正極材にナトリウム層状化合物、負極材にグラファイトやチタン酸化物を用いた電池である。原理はリチウムイオン電池と同じであり、リチウムイオンをナトリウムイオンに置き換えたものである。エネルギー密度は現在リチウムイオン電池より若干劣る程度であるが、研究開発によって性能が進化している。レアメタルフリーであることから低コスト化が見込まれ、大型蓄電池として期待される。

(2) 主な国内研究機関の動向

a. NEDO

日本では、各種蓄電池の包括的な技術開発の長期的計画として、新エネルギー・産業技術総合開発機構（New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO）が「NEDO二次電池技術開発ロードマップ2013」を発表している。このなかでは①自動車用（図52）、②定置用（図53）、③（リチウム蓄電池の）材料、のそれぞれについて、2030年やそれ以降の技術開発進行の目標を設定している。また、NEDOとしては現在、「リチウムイオン電池応用・実用化先端技術開発事業」「先進・革新蓄電池材料評価技術開発」「革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発」を実施し、主にリチウムイオン電池（車載用および定置用）の高性能・低コスト化の研究開発を支援している¹⁰²。

¹⁰² NEDO ウェブサイト



二次電池の課題		現行LIB	先進LIB	ブレークスルーが必要	革新電池
課題となる要素技術	正極	スピネルMn系他	高容量化・高電位化等		金属-空気電池 (Al, Li, Zn等)
	電解液	炭酸エステル系混合溶媒他	難燃性・高耐電圧性等		金属負極電池 (Al, Ca, Mg等) 等
	負極	炭素系	高容量化等		
	セパレータ	微多孔膜	複合化、高次構造化・高出力対応等		
	電池化技術	新電池材料組合せ技術/電極作製技術/固-液・固-固界面形成技術等			
長期的基礎・基盤技術の強化	界面の反応メカニズム・物質移動現象の解明、劣化メカニズムの解明、熱的安定性の解明、「その場観察」技術・電極表面分析技術の開発、等				
その他課題	システムとしての安全性・耐環境性の向上、V2H/V2G、中古利用・二次利用、リサイクル、標準化、残存性能の把握、充電技術等				

図 52 自動車用二次電池ロードマップ
出典：NEDO「NEDO 二次電池技術開発ロードマップ 2013」2013.

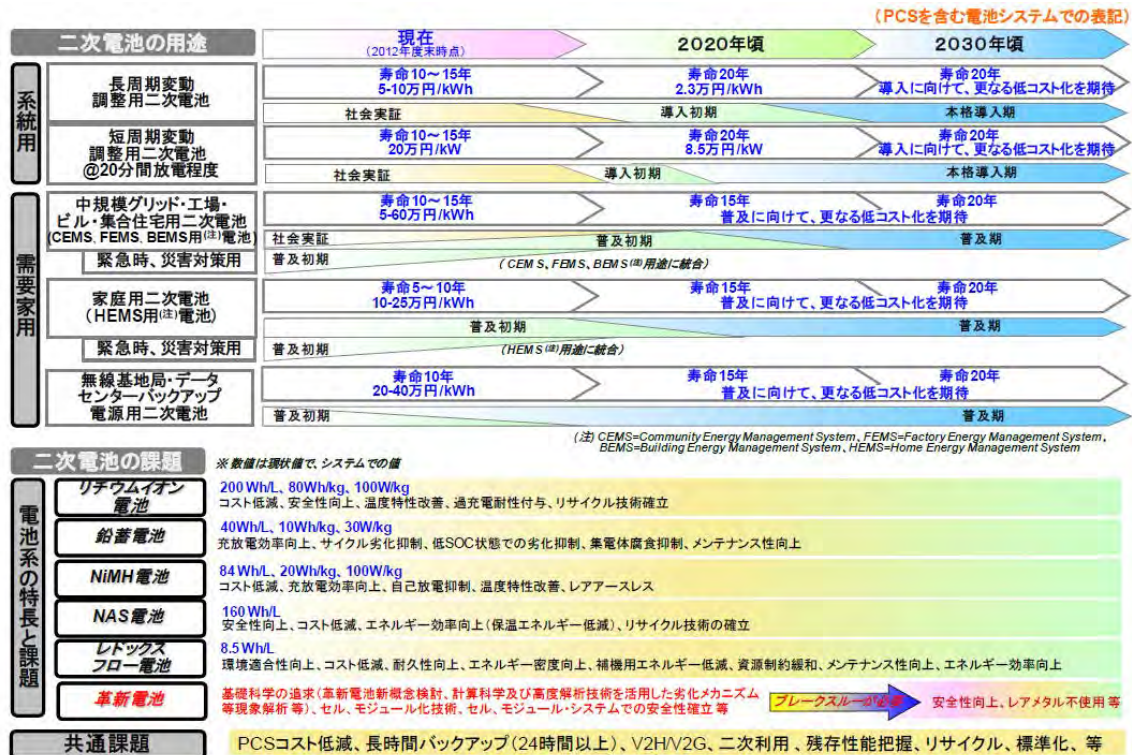


図 53 定置用二次電池ロードマップ
出典：NEDO「NEDO 二次電池技術開発ロードマップ 2013」2013.

b. 産総研

産業技術総合研究所（産総研）では多岐にわたる分野の研究部門の一つとして、電池技術研究部門が設けられている。蓄電池に関連する主な研究内容としては、リチウムイオン電池やニッケル水素電池などの材料技術、評価解析技術、システム化技術があげられるほか、より優れた次世代の蓄電池として、リチウム - 空気電池などの開発を進めている¹⁰³。

c. NITE

変動電源対策用途やスマートグリッド用途の蓄電池は現状では実証段階の域を出ていないが、この段階の研究開発を促進すべく、世界最大級の大型蓄電池システム試験・評価施設が製品評価技術基盤機構（National Institute of Technology and Evaluation, NITE）によって、大阪に建設されており、2016年中のサービス開始を予定している¹⁰⁴。

7.3. 主な国内企業

(1) GS ユアサ

GS ユアサは蓄電池分野では主に鉛蓄電池とリチウムイオン電池を主力製品とする。特に鉛蓄電池は2013年の時点で世界第二位¹⁰⁵のシェアを占めている。鉛蓄電池に関しては自動車用、二輪車用、産業用のそれぞれについて、国内・国外（特にアジア）それぞれの市場のニーズに合わせた規格の製品開発を進めている。リチウムイオン電池に関しては、中大型電池の信頼性、安全性、エネルギー密度の向上を目的とした基礎研究および、車載用電池の改良を行っている。また、宇宙用リチウムイオン電池に関する研究開発も実施している¹⁰⁶。

(2) 日本ガイシ

日本ガイシはNAS電池の唯一のメーカーである¹⁰⁷。1984年から東京電力と共同でNAS電池用固体電解質の開発を開始し、1989年からはNAS電池自体の研究開発に着手している。その後、長期性能と安全性の確立に成功し、2002年に事業化、2003年から世界で初めて量産を開始した。2016年3月には同社が三菱電機から受注し、九州電力豊前蓄電池変電所に納入した、世界最大級の規模（50MW/300MWh¹⁰⁸）の電力貯蔵用NAS電池が運転を開始している¹⁰⁹。

(3) パナソニック

パナソニックは車載用蓄電池（ニッケル水素電池・リチウムイオン電池）では世界トップクラスのシェアを持っているほか、ニッケル水素電池についても、乾電池型の家庭用のものから大型のインフラ用途のものまで手掛けている。また、太陽光発電システム用のリチウムイオン電池（住宅用・産業用）も製造している。世界的な太陽光発電の導入量増加に伴う蓄電池の需

¹⁰³ 産総研ウェブサイト

¹⁰⁴ NITE ウェブサイト

¹⁰⁵ 富士経済『電池関連市場実態総調査』2014.

¹⁰⁶ GS ユアサ有価証券報告書, 2016, p.16,17.

¹⁰⁷ 「NAS」が同社の登録商標となっている。

¹⁰⁸ 最大で50MWの電力を充放電でき、300MWhの電力を蓄積できることを意味する。

¹⁰⁹ 日本ガイシウェブサイト

要増について、パナソニックは車載用蓄電池市場の拡大と並んで重要視しており、2015年6月には電力需給の安定化が大きな課題となっているオーストラリアにおいて、電力小売会社3社と合同で系統電力への負荷軽減効果を目的とした住宅用蓄電池システムの実証実験プロジェクトを実施することを発表している¹¹⁰。

(3) 川崎重工業

川崎重工は大容量ニッケル水素電池「ギガセル」を製造している。大容量、高速充放電、サイクル耐久性、環境性、安全性、高リサイクル性、といった特徴があり、路面電車への搭載や地上蓄電設備、また変動電源の出力安定化といった幅広い用途を想定している。海外での納入実績は現在のところ、アメリカでの鉄道システム用途のもの2件のみである¹¹¹。

(4) 日立マクセル

日立マクセルはリチウムイオン電池およびリチウムイオン蓄電システムを製造している。マクセル製電池はアルミラミネート外装材の採用により、薄型・大容量を実現し、充放電時の放熱性にも優れている。また、マクセル独自の電極技術と積層電極構造を組み合わせることで低インピーダンス（内部抵抗）を実現し、高出力放電でも安定した性能を発揮する。2015年には従来品比約2倍のエネルギー密度を実現するリチウムイオン電池技術である、「ULSiON（アルシオン）」を開発している。そして、そうした製造技術を活用した電池について、大型から小型、さらにはコイン型やボタン型まで多彩なラインナップを揃えており、幅広いニーズに対応している。これらの電池を採用して製造された蓄電システムは基本的に家庭向けとして設計されており、太陽光発電との連携を視野に入れた HEMS（Home Energy Management System）に用いられる¹¹²。

(5) NEC

NEC では携帯電話や電動アシスト自転車向けから、EV 向けや系統用のリチウムイオン電池技術の開発・製造を進めている。NEC の電池技術を活かして日産自動車と共同開発した¹¹³リチウムイオン電池は信頼性や耐久性、安全性が評価され、EV「日産リーフ」に採用されている。一方、NEC の系統用蓄電システムは、系統連系機能とクラウドを介したエネルギーマネジメント機能を兼ね備えており、系統電力網や太陽電池に加え、燃料電池とも連携可能で、多様なエネルギーアクセス網と分散電源を巻き取る「ハブ」の役割を担うものとされている。NEC 製蓄電池には既に多くの実績があり、海外ではアメリカ、イギリス、イタリアなどに系統用蓄電池分野で進出している。これらの事例ではいずれもアメリカやヨーロッパで最大規模となる蓄電システムを納入している¹¹⁴。

¹¹⁰ 日立製作所ウェブサイト

¹¹¹ 川崎重工ウェブサイト

¹¹² 日立マクセルウェブサイト

¹¹³ 2016年8月に日産は車載用蓄電池事業からの撤退を表明しており、NEC との共同出資子会社を売却する方針である。（2016年8月6日付日経新聞記事）

¹¹⁴ NEC ウェブサイト

(6) 東芝

東芝は「SCiB」と呼ばれるリチウムイオン電池を製造している。SCiBは負極にチタン酸リチウムを採用することにより、安全性、長寿命、低温性能、急速充電、高入出力、第容量を実現している。自動車・バス・鉄道などの乗り物や、エレベーターなどの産業機器、発電所などのインフラ設備のほか、HEMS¹¹⁵用蓄電システム「エネグーン」にも採用されている。系統用のはアメリカやイタリアに進出し、再生可能エネルギーの出力調整に活用されている。車載用のものがProterra社（アメリカ）のEVバスやVan Hool社（ベルギー）のハイブリッド式トラムバス（ヨーロッパ10都市以上で運行）、そして渦潮電機の電動三輪車量（フィリピン向け）に採用されている¹¹⁶。

(7) 住友電気工業

住友電工は家庭・オフィス向けのリチウムイオン電池「POWER DEPO II」を製造しているほか、バナジウムレドックスフロー電池を製造している点が強みである。2015年12月には北海道電力と共同で進めてきた、南早来変電所の世界最大級の規模の蓄電システムが運転を開始している。また、現地工事を大幅に簡易化できる新型（コンテナタイプ）も2016年度中に発表する予定としている¹¹⁷。

(8) ソニー

ソニーはリチウムイオン電池の大手であり、先駆者ともいえる企業であったが、2016年7月に電池事業を村田製作所に譲渡し、撤退することを表明した。東洋経済などはこの要因を、ノートパソコンやスマートフォン用の需要が鈍化し、主な需要の伸びが車載用に移ったことにある¹¹⁸としている。

7.4. 他国の主な研究開発動向

(1) アメリカ

アメリカではカリフォルニア州やテキサス州など多くの州で再生可能エネルギー発電の導入が進んでいることもあり、最大規模の蓄電池市場¹¹⁹とされている。アメリカの再生可能エネルギー研究開発において中心的な役割を占めている国立再生可能エネルギー研究所（National Renewable Energy Laboratory, NREL）では主に車載用リチウムイオン電池の研究が進められており、素材の開発・評価、寿命や安全性強化のための冷熱試験、総合的な性能評価のためのモデリングやシミュレーションが中心となっている。また、エネルギー省が設定した、次世代電気自動車の目標に合わせ、蓄電池のコストを現状の350-550ドル/kWhから125ドル/kWhにまで

¹¹⁵ 東芝では複数の家庭のHEMSを連携させるクラウドサービス「フェミティ倶楽部」を提供しており、それに対応した各種機器（蓄電池のほか、エネルギー計測ユニット、ITアクセスポイント、LEDライト、エアコン、給湯器など）を販売している。

¹¹⁶ 東芝ウェブサイト

¹¹⁷ 住友電工ウェブサイト

¹¹⁸ 2016年7月30日付東洋経済オンライン記事

¹¹⁹ IRENA, “Battery Storage for Renewables: Market Status and Technology Outlook,” 2015, p.31.

引き下げる、寿命を現状の8年から15年にまで伸ばす、といった目標を追求している。加えて、次世代の蓄電池としてリチウム-空気電池などの開発も進めている¹²⁰。マサチューセッツ工科大学（Massachusetts Institute of Technology, MIT）でもリチウムイオン電池の研究が行われているが、車載用以外にも系統用をはじめとした幅広い用途を目指しているほか、リチウム-空気電池や液体金属電池といった次世代蓄電池の研究も行われている¹²¹。これに限らずアメリカでは新型蓄電池の研究開発が盛んで、近年ではハーバード大学が、安全、安価、非腐食性¹²²、高性能の全てを満たすと期待される有機フロー電池の研究成果を発表している¹²³。

(2) ヨーロッパ

アメリカと並んで再生可能エネルギーの導入が進んでいるヨーロッパでは、ドイツやスペインなどをはじめとする多くの国々で、総発電量に占める太陽光発電や風力発電の割合が高くなっている。したがって、アメリカと同様に系統対策用蓄電池の需要も高まっている。欧州連合（European Union, EU）では加盟国間共同で様々な分野の研究活動を行うための支援枠組みプログラム（Framework Programme, FP）が設けられている。2007年から2013年まで¹²⁴実施されたFP7の終了後は、2014年から2020年までを実施期間としてHorizon 2020と呼ばれる新たな枠組みが立ち上げられている。どちらの枠組みでも蓄電池自体や電気自動車、そしてスマートグリッド関連のプロジェクトが多数採択されており、資金的な支援を受けている。例えば「高エネルギーリチウム硫黄セル・電池（High energy lithium sulphur cells and batteries, HELIS）」プロジェクトには7カ国から14機関が参加しており、4年間で累計約800万ユーロとなる費用の全額をEUが負担している¹²⁵。また、FP6によって2004年に設立された電池関連技術の研究機関であるALISTORE ERI（European Research Institute）は5年間のEUによる出資の後、各国から加盟した19の機関からの出資によって、現在も存続している。ALISTORE ERIではリチウムイオン電池のほか、新型のナトリウムイオン電池の研究も行われている¹²⁶。各国の蓄電池関連企業・研究機関としては、フランスのSAFTやドイツのフラウンホーファー研究機構（Fraunhofer-Gesellschaft）などがあげられる。

(3) 中国

中国は近年、蓄電池分野での活動を活発化させており、研究開発にも力を入れている。2016年には大連化学物理学研究所（Dalian Institute of Chemical Physics, DICP）がフロー電池用の性能向上に資する新型薄膜を開発したほか、深セン先進技術研究院（Shenzhen Institutes of Advanced Technology, SIAT）が新型のアルミニウムイオン電池のエネルギー密度測定に関する

¹²⁰ NREL ウェブサイト

¹²¹ MIT Energy Initiative ウェブサイト

¹²² 現行のフロー電池はバナジウムなどの腐食性金属を使用している。

¹²³ Harvard gazette, July 18, 2016.

¹²⁴ FP7の枠組み自体は既に終了しているものの、その枠組みで補助を受けて実施中のプロジェクトは依然として多数存在する。

¹²⁵ Community Research and Development Information Service (CORDIS) (http://cordis.europa.eu/project/rcn/199917_en.html)

¹²⁶ ALISTORE ERI ウェブサイト

研究成果を発表している¹²⁷。

(4) 韓国

韓国も近年、蓄電池分野での存在感が急速に拡大している。2013年時点では Samsung SDI がリチウムイオン電池市場で世界第一位¹²⁸のシェアを獲得した。同社の研究開発部門は小型から車載用まで、リチウムイオン電池の高性能化に関する研究を行っているほか、2014年には世界初の折り曲げ可能な電池を開発しており、様々な形状の製品に採用可能にした¹²⁹。同国の LG 化学も各種蓄電池の製造・販売や研究開発を行っているが、特に車載用リチウムイオン電池部門での活躍が目覚ましく、アメリカの GM をはじめとした多くのメーカーの電気自動車に採用されている¹³⁰。

¹²⁷ 中国科学院ウェブサイト

¹²⁸ 富士経済 (2014), *op.cit.*

¹²⁹ Samsung SDI ウェブサイト

¹³⁰ LG ケミカルウェブサイト

8. 水素・燃料電池・アンモニア

8.1. 開発・導入の必要性

(1) エネルギー安全保障・省エネ・環境性

燃料電池は1960年代に米国の宇宙飛行計画における宇宙船での電源として世界で初めて実用化されたが、我が国では、1978年に開始されたムーンライト計画において開発が開始され、1993年のニューサンシャイン計画でも継続された。石油危機後、エネルギー・セキュリティ改善に資する省エネルギー機器の一つとして燃料電池の開発が進む。その後、様々な研究開発が継続され、近年では、新エネルギー財団（NEF）による定置用燃料電池の大規模実証試験が実施され、2009年のエネファーム（定置式家庭用燃料電池）の商品化へとつながった。また、2014年12月にはトヨタ自動車の世界初の燃料電池自動車販売を始め、2016年3月にはホンダが続いて販売を開始した。

水素は利用時に二酸化炭素を排出しないクリーンなエネルギーであること、燃料電池などを用いることで高効率利用が可能であるという利点から、低炭素と省エネルギー性を両方兼ね備えている。また、電力と異なり貯蔵が比較的容易であることから、次世代のエネルギー・システムのエネルギー源として期待されている。一方で、水素は二次エネルギーであることから、必ず他のエネルギー源から製造しなくてはならないこと、製造過程によってはCO₂が排出されること、輸送・貯蔵には従来のエネルギー・システムとは異なるシステムを構築しなければならないことが課題である。我が国においては、1974年に開始されたサンシャイン計画、1978年に開始されたムーンライト計画、1993年のニューサンシャイン計画等を通じて、水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術（WE-NET）の研究開発が進められてきた。

近年では、METIに設置された水素・燃料電池戦略協議会が2014年6月に「水素・燃料電池戦略ロードマップ」を策定し、2016年3月に同ロードマップが改訂されている。ロードマップでは、2030年までの定置用燃料電池、燃料電池自動車、水素ステーションの導入目標量が設定されている。また、2040年頃を目途に、CO₂フリーな水素供給システムを確立することを目指している。

(2) 日本企業の競争力

欧米先進国でも燃料電池関連の研究開発は進められてきたが、図54に示すように、特許件数の推移を見ると、2010年に我が国は米国を抜いて世界1位となった。

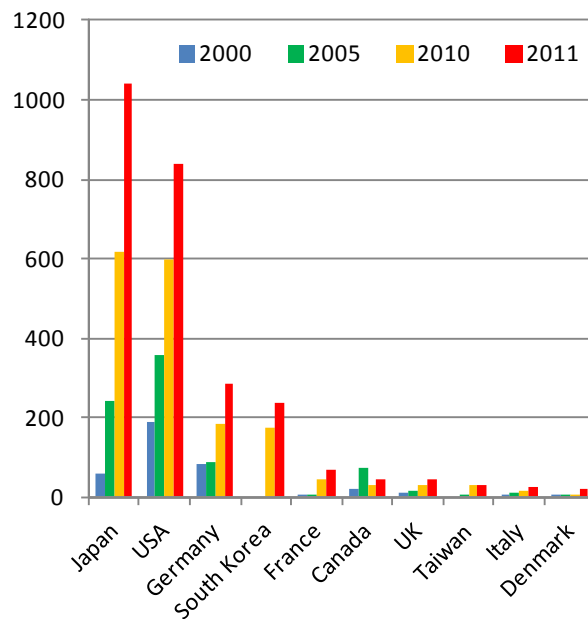


図 54 燃料電池関連特許数の国際比較

出典：“The 2011 Fuel Cell Patent Review”, “The 2012 Fuel Cell Patent Review”, FuelCellToday

(3) 現在の導入量および導入目標

2009年に商品化されたエネファームは、年々導入が進み、2015年度末の累積導入量は16万台を超える。発電容量に換算すると113MWである(図55)。METIに設置された水素・燃料電池戦略協議会が2014年6月に「水素・燃料電池戦略ロードマップ」を策定し、2016年3月に同ロードマップが改訂された。本ロードマップでは、2020年に140万台、2030年に530万台の普及を目指す。

業務・産業用燃料電池に関しては補助金制度によってPAFC型を中心に1990年代から導入が進んだが、補助金制度の打ち切り、高額なスタック交換費用などが原因で、現在導入は進んでいない(図55)。ただし、ロードマップでは、2017年に業務・産業用燃料電池の市場投入を目指している。

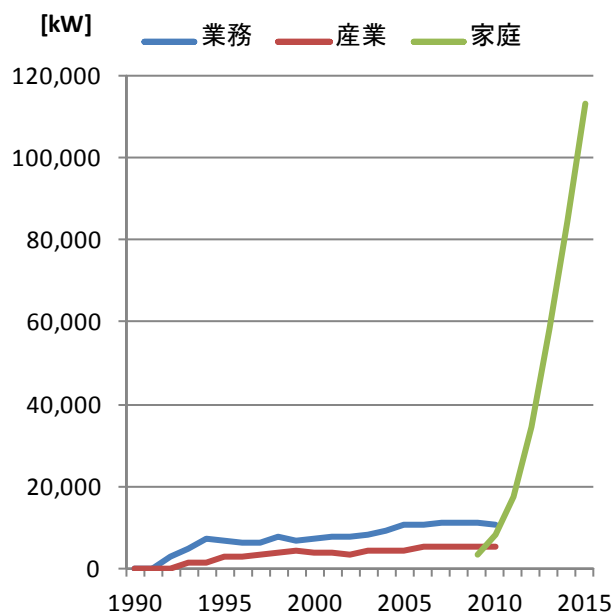


図 55 我が国の累積導入量

出典：コージェネレーション・エネルギー高度利用センター資料等から推計

図 56 には世界の地域別燃料電池の市場規模を示す。近年のアジア地域での急激な伸びは、日本の家庭用燃料電池（PEFC）の伸びに起因する。一方、北米では、SOFC と MCFC が市場をけん引している。

また燃料電池自動車に関しては、2014年12月に世界初めてトヨタ自動車燃料電池自動車の販売を開始し、さらに2016年3月にはホンダも販売を開始した。2015年末までに国内で約400台が販売されている。

なお、上述のロードマップでは、2020年までに4万台、2025年までに20万台、2030年までに80万台の普及を目指している。水素ステーションは2020年度までに160箇所程度、2025年度までに320箇所程度の整備を目標としている。

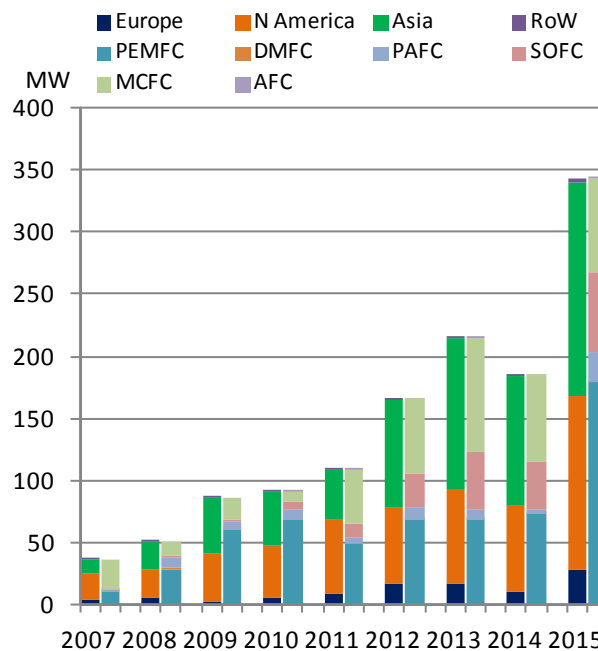


図 56 地域別・タイプ別市場規模

出典：“The Fuel Cell Industry Review 2012～2015”, FuelCellToday

8.2. 国内の技術開発動向

(1) 燃料電池

りん酸形（PAFC）は、1960年代から開発され、民生用燃料電池として長い歴史を持つ。作動温度は 200℃で、100kW～200kW のパッケージが業務・産業用コージェネレーションとして導入されている。電解質がりん酸水溶液であるため蒸発による逸失、燃料中の一酸化炭素による触媒白金の被毒などが課題とされている。他の燃料電池と比べて商品化は早いものの、発電効率が低いこともあり近年導入が進んでいない。

固体高分子形（PEFC）は、りん酸形と同様に触媒に白金を使用するが、電解質の高分子膜を使用しているため電解質の逸失がないという利点がある。また、作動温度が 80℃で起動が早く、高出力密度であることから小型軽量化が可能であるため、自動車用に適している。世界で初めて我が国で 2009 年に商品化された家庭用燃料電池コージェネレーションシステム（エネファーム）は固体高分子形である。また、2014 年 12 月には、トヨタ自動車は燃料電池自動車（PEFC 搭載）の販売を世界で初めて開始した。りん酸形と比べて高効率であることから、現在、現在技術開発の中心となっている。家庭用燃料電池のシステム価格は現在 140 万円程度であるが、上述のロードマップでは、更なるコスト削減が目標とされ、2019 年までに 80 万円までにすることを目標としている（図 57）。そのためには、スタックの白金使用量の削減のみならず、燃料処理器、貯湯槽、補機類など各構成部品のコストダウンが求められる。

固体酸化物形（SOFC）は、電解質に安定化ジルコニアなどの固体酸化物を使用している。電解質が固体であることから逸失や腐食などの心配がない、反応が容易に進行することから白金などの貴金属触媒が不要である、発電効率が高いなどの利点がある。作動温度が 1,000℃で

あることから、排熱を利用したガスタービンとのハイブリッドシステムも検討されている。高温で運転するために電力負荷追従性が弱いことが課題であったが、我が国で実施された大規模の実証試験では高い負荷追従性を示すことが示され、家庭用燃料電池コージェネレーションシステム（エネファーム）として2011年から商品化されている。システム価格は現在180万円程度であるが、上述のロードマップでは、更なるコスト削減が目標とされ、2019年までに100万円までにすることを目標としている（図57）。

溶融炭酸塩形（MCFC）は、電解質に溶融した炭酸塩を使用する。固体酸化物形の次に作動温度が高く650℃であり、反応が容易に進行することから白金などの貴金属触媒が不要である。りん酸形と同様に、業務・産業用のコージェネレーションとして市場投入されている。

表 31 燃料電池の種類と特徴

	固体高分子形 PEFC	固体酸化物形 SOFC	溶融炭酸塩形 MCFC	りん酸形 PAFC
電解質	イオン交換膜	安定化ジルコニア等	炭酸塩	りん酸
作動温度	80℃	1,000℃	650℃	200℃
発電効率	40~60%	50~65%	45~60%	35~40%
発電出力	<250kW	<200kW	>200kW	>50kW
用途	自動車、小型定置式	定置式	定置式	定置式
触媒	白金	不要	不要	白金

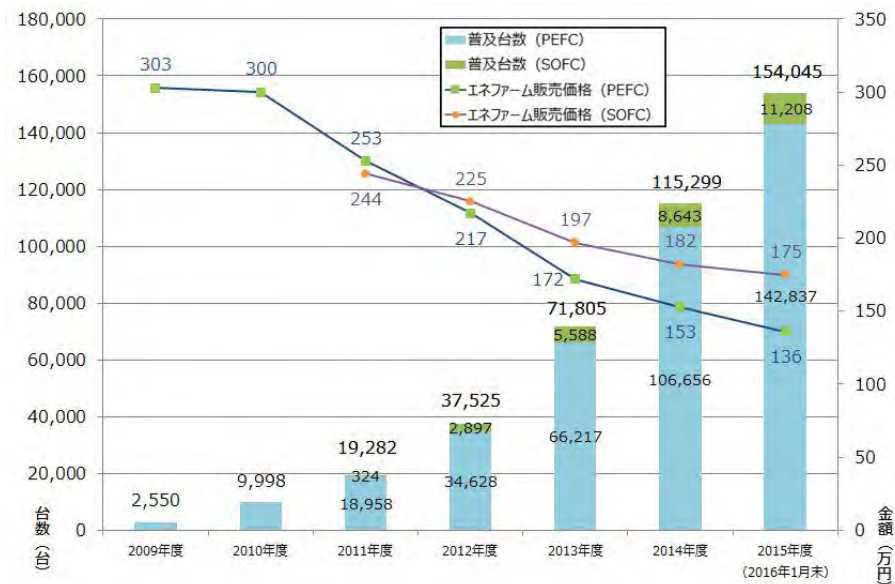


図 57 エネファームの価格・台数の推移

出典：“水素・燃料電池戦略ロードマップ”、平成 28 年 3 月 22 日

(2) 水素発電

製油所や製鉄所において、水素を含む副生ガス燃焼による発電（水素混焼）は従来から行われている。また、IGCC（石炭ガス化複合発電）における石炭ガス化ガスにも水素が多く含まれている。一方、水素専焼発電の例は非常に少なく、イタリアの Enel や米国の GE が開発・

実証を行っているにすぎない。

水素燃焼タービンは、ガスタービン発電と同種の発電方式で、基本的には、天然ガス用として設計されたガスタービンを用いることができ、タービンの入口温度は天然ガスより高く1,700°Cとなり、発電端の熱効率を60%超にすることが可能となる。ただし、タービン入り口温度が高温になることから、新たなタービン材料の開発、冷却方法の開発が必要となる。

また、水素は、燃焼速度が速いため燃焼器に炎が遡る逆火が生じて燃焼器が焼損するリスクがある、燃焼温度が高いためNO_xが発生しやすいといった特徴があり、新たな燃焼器の開発も求められる。拡散燃焼方式は逆火リスクが比較的少ないが、予混合燃焼方式（天然ガス火力で採用）と比べるとNO_xの発生を抑制するため希釈剤を入れなければならず、火炎温度が下がり効率が低下する。したがって、高い発電効率が得られる予混合燃焼方式を採用するために逆化リスク対策の技術開発が必要となる。若しくは、希釈液が不要な新たな燃焼方式を目指すことが求められる。

我が国では、2014年度に、水素・燃料電池戦略協議会の下に“水素発電に関する検討会”が設立され、上記ロードマップに示された水素発電の導入に向けた検討を行い報告書が取りまとめられた（2015年3月19日）。技術開発のみならず、水素発電における、水素の取扱い・規制の見直しが必要とされている。また、水素発電に低価格かつ安定的に水素を供給できるサプライチェーンの構築も重要課題である。

(3) 水素の製造・輸送・貯蔵

1) 製造

① 化石燃料の改質

化石エネルギー源を改質装置で水素に変換する水蒸気改質法が最も一般的であり、技術的には確立されている。ただし、改質過程で二酸化炭素が排出される。したがって、CCS技術と組み合わせることが検討されている。

② 電気分解

水を電気分解することで、水素を製造する。現在、アルカリ水電解と固体高分子形水電解の二方法が広く用いられている。CO₂フリー水素を製造するために再生可能エネルギー電力の利用が想定される。なお、水素製造原単位は現在約5kWh/Nm³（理論下限値3.54kWh/Nm³）である。

NEDOのロードマップ（“NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ2010”）では、電解効率の向上及び設備費の削減の2030年までの目標が策定されている（図58）。

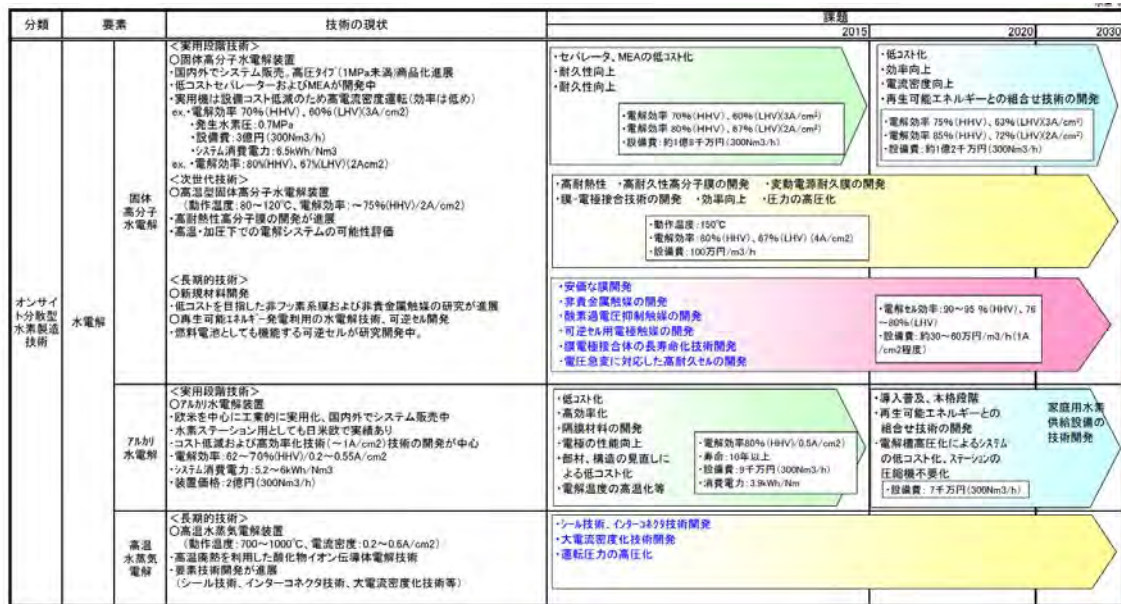


図 58 電気分解技術のロードマップ

また、自然変動型再生可能エネルギーの系統安定化対策として、水素製造が注目されている。再生可能エネルギーの余剰電力等を用い電解装置によって水素を製造する技術であり、Power to Gas と呼ばれている。ドイツでは、水素を直接天然ガスパイプラインに注入したり、水素と二酸化炭素からメタンを生成した後にパイプラインに注入する実証試験が実施されている。また、水素と二酸化炭素から液体燃料を生成する Power to Fuel の取組みも見られる。

Power to Gas/Fuel は、再生可能エネルギーの出力変動を、電力系統のみならず都市ガスネットワークや運輸部門も含めたエネルギー・システム全体で対応するという特徴があり、インフラ整備状況が実現可能性を左右する。

ただし、電解装置、水素貯蔵・輸送設備、水素利用機器を含めた水素利用システムの構築やその経済性が課題となる。

③ 副生水素

鉄鋼、石油精製、苛性ソーダ等の産業におけるプロセスで発生する水素もしくは水素を含むガス(副生水素)を精製することで、水素を外部に供給する。ただし、これらの副生水素は、各プロセスにおいて脱硫等の工業用原料やボイラ用の熱エネルギーとして既に利用されており、十分な供給量を確保し得るかは不明である。また、水素を外部供給することで、代替燃料が必要となることから、CO₂フリーではないことに留意が必要である。

2) 輸送・貯蔵

水素を効率的に輸送・貯蔵するためには減容が必要であり、圧縮水素、液化水素、水素吸蔵合金、有機ヒドライド、アンモニアなどの技術が挙げられる。これらの技術のうち、現在注目されているのは、液化水素、有機ヒドライド、アンモニアである。(アンモニアについては、(4)にて後述。)

NEDO では、2015年度から、海外の未利用エネルギーを利用して水素を製造・貯蔵・輸送

し、日本国内で利用する大規模な水素エネルギー利用システムの技術開発プロジェクト（実証事業）を実施している。

① 液化水素

液化水素は、圧縮水素（20MPa）と比べて容積が 1/12 になることから、輸送が容易になる。液体水素は宇宙ロケット用に 1950 年代後半から既に利用されている。ボイルオフを防ぐための断熱が重要な技術的課題である。また、液化にはマイナス 253℃という極低温が要求されることから水素の持つエネルギーの約 20%が低温化に消費されることから、低温化に要するエネルギー効率の向上が課題である。

② 有機ハイドライド

有機ハイドライドとは、芳香族化合物に水素を結合させたものであり、メチルシクロヘキサンやデカリンなどがある。現在、メチルシクロヘキサンの技術開発が進められている。水素化の際（例えばトルエン⇒メチルシクロヘキサン）は発熱反応、脱水素化（例えばメチルシクロヘキサン⇒トルエン）の際は吸熱反応であることから、水素を取り出すためには熱（水素の持つエネルギーの 20%以上）を供給しなければならない。このため、脱水素反応での必要熱量の削減、水素化の際の熱の利用方法の検討が課題となる。

有機ハイドライドは繰り返し利用可能であり、常温・常圧で液体であることから石油製品と同様に取り扱うことが可能である。したがって、現在の石油製品流通インフラをほぼそのまま活用することができるという特長を持つ。

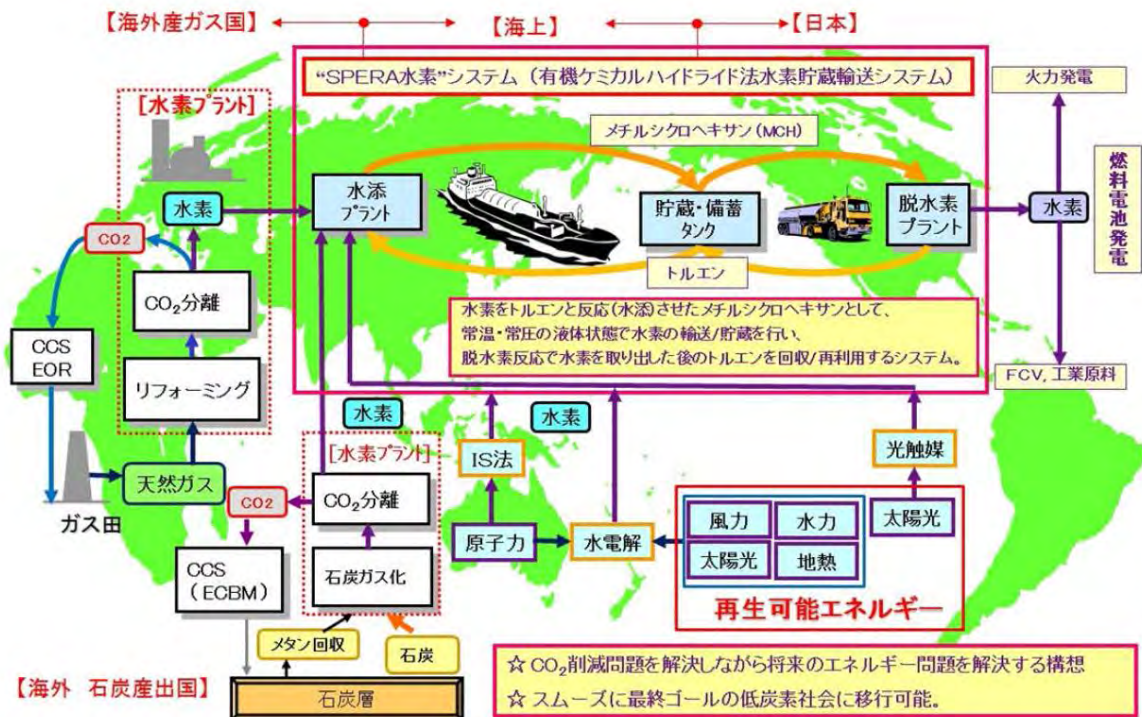


図 59 水素サプライチェーン構想

出所：水素エネルギーの大規模貯蔵輸送技術－SPERA 水素®システム－技術実証デモンストレーション
 評価報告書（SPERA 水素®システム技術実証評価に関する有識者委員会 2016.8）



図 60 未利用エネルギーを活用した水素サプライチェーン構築

出所：経済産業省 資料

(4) アンモニア

アンモニアは、水素体積密度がエネルギーキャリアの中では最も高い。常温常圧では気体であるが、沸点は -33°C (LPGと同程度)であり、液体になりやすく運搬に都合がいいという特長がある。脱水素は吸熱反応であり、含有水素熱量の約10%の熱が必要である。アンモニアは劇物であることから取扱いに注意が必要であるが、吸収式冷凍機の冷媒で利用実績はある。

このようにアンモニアはエネルギーキャリアとしての機能を有するが、直接燃焼やアンモニア燃料電池の研究開発も行われている(内閣府のSIP、AIST、JSTなど)。アンモニア直接燃焼発電は、水素燃焼発電と異なり、燃料であるアンモニアが現在は肥料用途として既に世界的に流通しており安定供給に問題はないというメリットがある。ただし、燃焼時のNOX発生の制御が課題となる。

現在検討されているアンモニア燃料電池はSOFC型である。アンモニアの分解温度は 600°C であり、SOFCの作動温度(700°C)で分解が可能である。

現在のアンモニア製造方法のハーバー・ボッシュ法では、水素が必要であり、アンモニアをCO2フリーにするためには、化石燃料+CCS・EORでの水素製造、若しくは、再生可能エネルギーからの水素製造が必要である。

途上国で肥料としてアンモニアが流通しているところでは、エネルギーキャリアとしてのアンモニアの利用がなじみやすいとも考えられる。

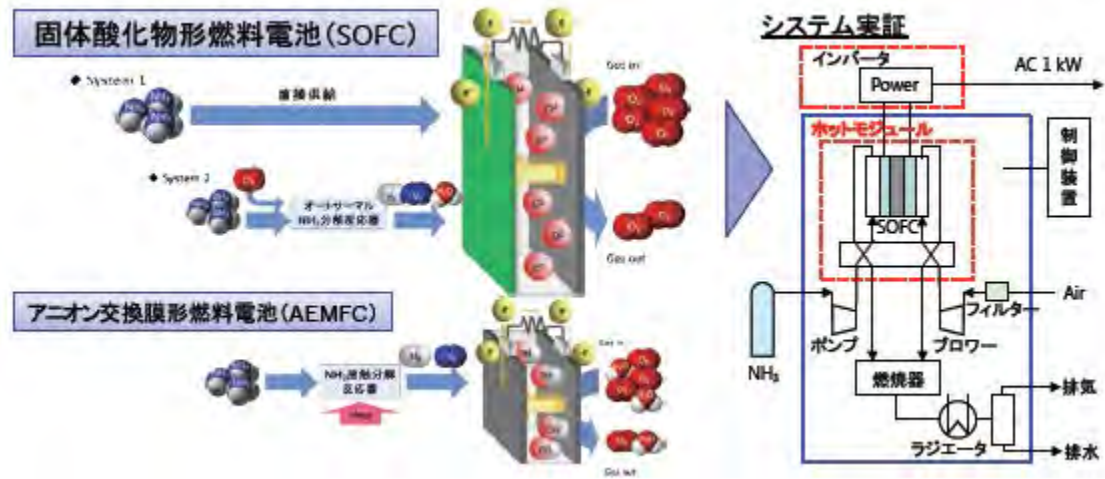


図 61 アンモニア燃料電池

出所：「エネルギーキャリア」戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）

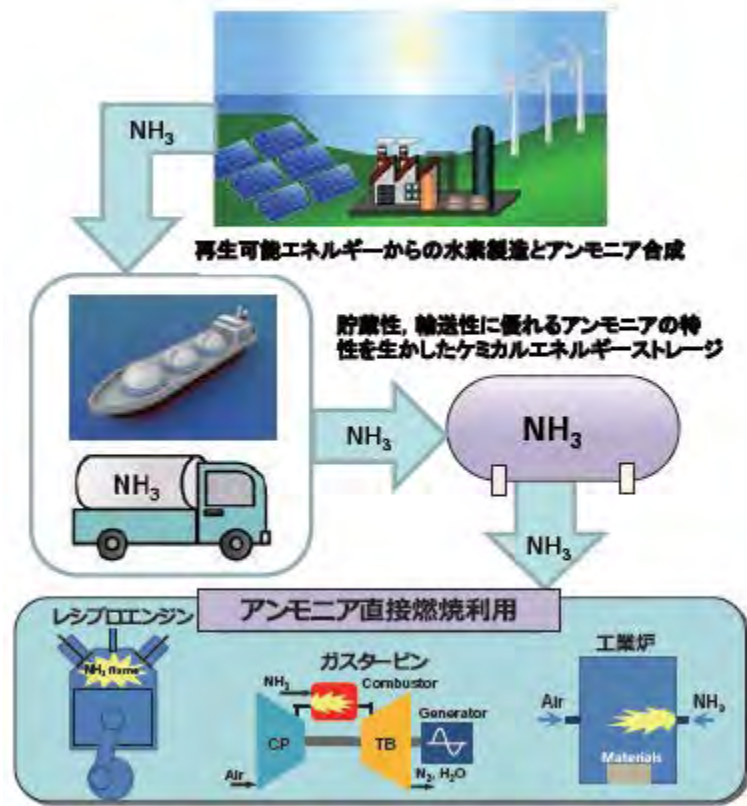


図 62 アンモニア直接燃焼

出所：「エネルギーキャリア」戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）

8.3. 主な国内企業

(1) 定置用燃料電池

- ・ PEFC : パナソニック、東芝
- ・ SOFC : 京セラ (家庭用)、アイシン精機 (家庭用)、三浦工業 (業務用)
三菱日立パワーシステムズ (業務用)
- ・ PAFC : 富士電機

なお、パナソニックは、欧州に進出 (2014 年)。

(2) 燃料電池自動車

トヨタ、ホンダ

(3) 水素製造・輸送・貯蔵

1) 製造

- ① 改質 : JX、東京ガス、大阪ガス、JPOWER
- ② 電気分解 : 旭化成、東レ

2) 輸送・貯蔵

川崎重工、千代田化工建設、JX、岩谷産業、日揮

(4) アンモニア (輸送・貯蔵)

アンモニア合成システム : 日揮、千代田化工建設

アンモニア燃料電池 : 日本触媒、三井化学、トクヤマ

アンモニア直接燃焼 : IHI、大陽日酸、宇部興産

8.4. 他国の主な研究開発動向

(1) アメリカ

技術開発への支援は DOE が行っているが、様々な用途において価格競争力のある燃料電池の技術開発を行うことを目標としており、具体的目標を以下に示す¹³¹。

- ・ 乗用車用の燃料電池コストを 2020 年までに \$40/kW 以下。長期的には \$30/kW で 5,000 時間の耐久性。なお、コストは 2013 年には \$55/kW (2006 年から 50%、2008 年から 30% の削減) であった。
- ・ 定置式の燃料電池コストを \$1,500/kW 以下
- ・ 2020 年までに再生可能由来水素をガソリンと競争力のある価格とする (\$4/gge : 製造・輸送・充填 ; producing , delivering and dispensing)

¹³¹ FUEL CELL TECHNOLOGIES OFFICE, FY 2015 BUDGET AT-A-GLANCE

注：gge (gallon gasoline equivalent) は水素 1.019kg¹³²に相当。したがって、\$4/gge は\$3.93/kg (= \$0.35/Nm³) となる。なお、現在の日本の水素ステーションにおける販売価格は 90～100 円/Nm³ (政策的に決められた価格：ランニングでガソリン車と同等の経済性を確保するための価格) である。

燃料電池のコスト削減には、使用される白金の量を削減することが重要課題であり、白金 1g あたりの発電出力を 2008 年の 2.8kW/g から 2013 年には 6.0kW/g まで向上が実現されており、2015 年は 6.5kW/g、2020 年に 8.0kW/g を目指している (図 63)。

再生可能エネルギーからの水素の製造・輸送・充填コストに関しては、2011 年の\$8/gge から 2015 年には\$6.8/gge まで削減すると見込まれている。また、水素貯蔵技術に関しては、2013 年の\$17/kWh から 2015 年には 15%のコストダウンが見込まれている。

なお、DOE では天然ガスを改質して水素を製造する技術は既に開発済みであるとして、今後は中期的にはバイオマスからの水素製造、長期的には太陽光発電からの水素製造を目指して研究開発を支援する。また、水素の配送・販売コストを下げるため、水素ステーション関連技術の研究開発ではコンプレッサーと貯蔵の技術を中心に研究開発を支援するとしている。

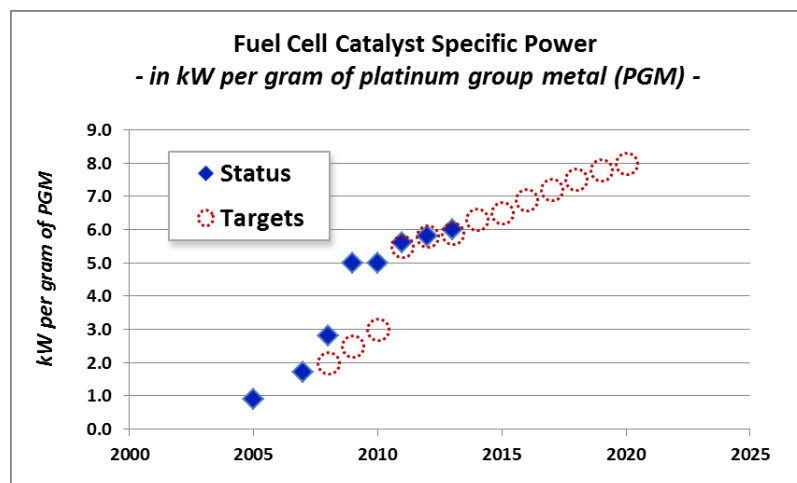


図 63 米国 DOE における触媒 1g あたりの燃料電池出力の実績と目標
出所：FUEL CELL TECHNOLOGIES OFFICE, FY 2015 BUDGET AT-A-GLANCE

¹³² http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/epact/fuel_conversion_factors.html

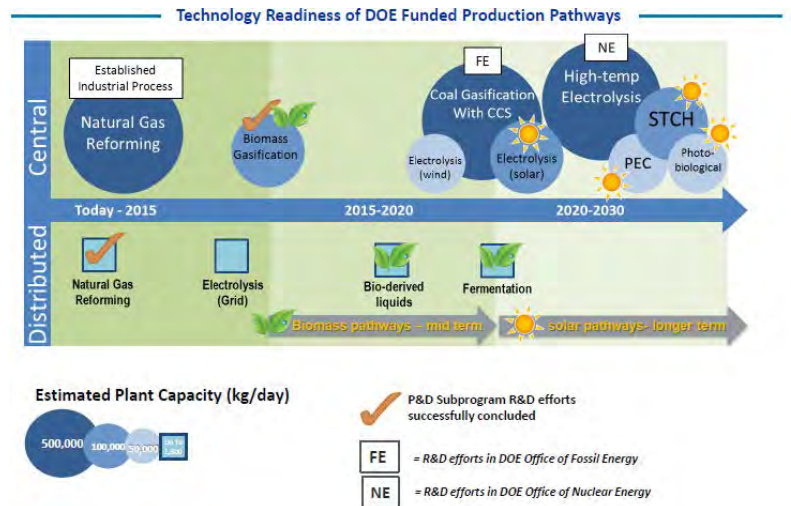


図 64 DOE の水素製造に関する今後の取り組みの方向性

出所 : DOE, Hydrogen and Fuel Cell Technologies FY 2013 Budget Request Rollout, April 12, 2013, P22

(2) ヨーロッパ

1) 定置用燃料電池

欧州では、ドイツが家庭用定置式燃料電池の実証試験でリードしている。NOW (Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie: National Organization Hydrogene and Fuel Cell Technology) のNIP (National Innovation Programme) の枠組みの中で家庭用燃料電池の実証試験 callux が行われている。

本プロジェクトは2008年にプロトタイプ燃料電池のフィールドテストを開始し、2014年末で合計474ユニットが導入されている。2016年の市場投入を目指している。

参画企業は、燃料電池メーカーのBAXI INNOTECH、Hexis、Vaillantとエネルギー会社のEnBW、E.ON、EWE、MVV Energie、VNG Verbundnetz Gasである。Vaillant、HexusがSOFC、BAXIがPEFCを提供している。概ねPEFCとSOFCが50%ずつである。



図 65 callux における家庭用燃料電池の設置状況

出典：

<http://enefield.eu/news/callux-fuel-cell-heating-appliances-ready-for-market-launch/>

また、欧州大では、ene.field と呼ばれる定置用燃料電池実証試験が、産業界と EC の FCH-JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking) の共同で実施されており (2012 年~2017 年)、合計で 1,000 ユニットの導入予定である。Callux と同様に、定置用燃料電池の商品化を目指している。

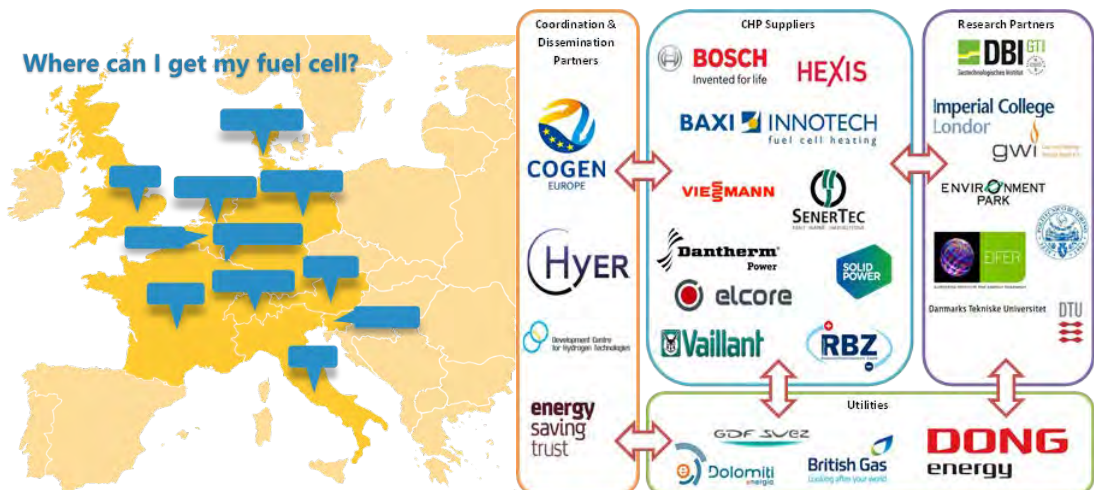


図 66 ene.field プロジェクトの参画国・企業・団体

2) Power to Gas

ドイツを中心に、系統安定化対策の一つとして、再生可能エネルギーの余剰電力からの水素製造・利活用に向けた動きが見られる。再エネを用いた水素製造は Power to Gas と呼ばれ、ドイツでは 20 件近い実証試験が行われている。

DENA（Deutsche Energie-Agentur：ドイツ・エネルギー機構）によると、R&D と実証を実施することで、2020 年までに大規模 Power-to-Gas のシステム技術仕様を確立する狙いがある。2020 年以降は、大規模 Power to Gas の投資環境を整備していく。

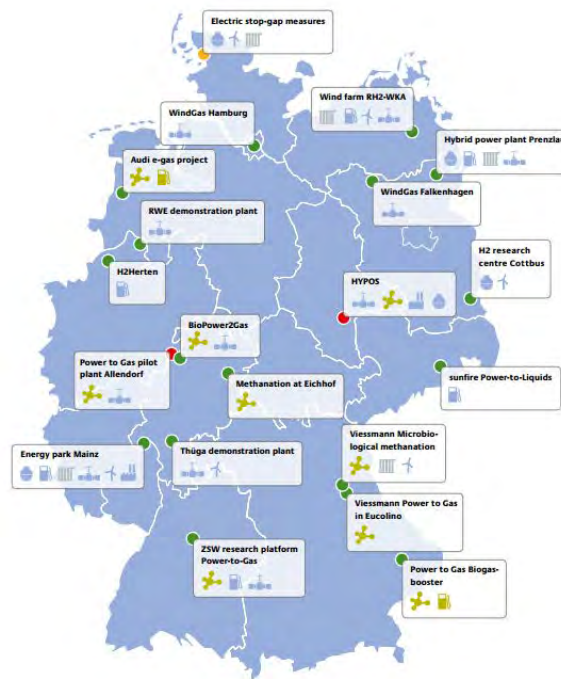


図 67 ドイツにおける Power to Gas 実証試験箇所

出典：dena 「Power to Gas system solution. Opportunities, challenges and parameters on the way to marketability」

3) 電気分解

FCH-JU（Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking）の、電気分解技術の調査報告書に基づくと、現在の産業部門における電解用途から、将来的には、燃料電池自動車用水素供給技術やエネルギー貯蔵技術としての電解用途へと拡大するものと見込まれている。

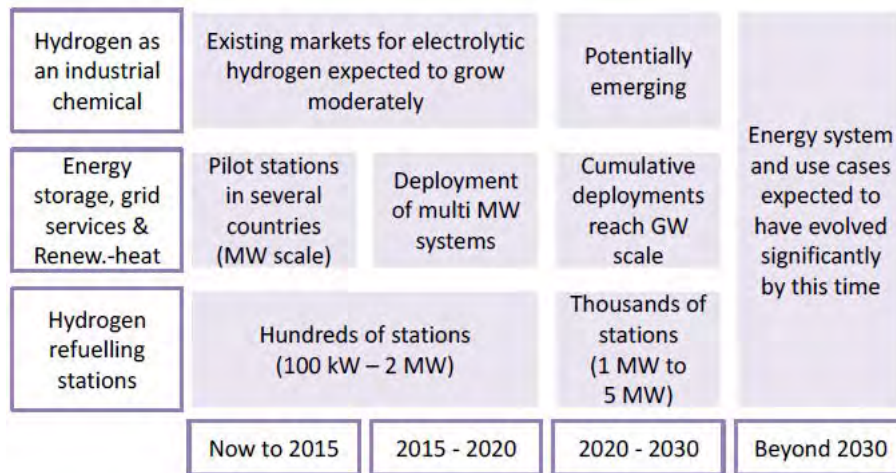


図 68 電解用途の拡大

出典：“Development of Water Electrolysis in the European Union, Final Report”, Fuel cells and hydrogen Joint undertaking, 2014

(3) 主な企業

定置式

Bloomenergy：米国、SOFC（モノジェネ）

Fuel Cell Energy：米国、MCFC

Ceres Power：英国、SOFC、日本に進出（2014年）

POSCO：韓国、MCFC

運輸用

Plugpower：米国、フォークリフト用FC

水電解

PROTON on site：米国

HYDROGENICS：カナダ

NEL Hydrogen：ノルウェー

McPhy Energy：ドイツ

9. 次世代照明

9.1. 開発・導入の必要性

2015年に日本政府は温室効果ガスを2013年比26%削減する約束草案(INDC)を国連気候変動枠組み条約(UNFCCC)に提出し、同年に開催されたCOP21においてパリ協定が採択されたことを踏まえ、2016年に目標を達成するための地球温暖化対策計画が策定された。

この一環として、LED等の高効率照明を2020年までにフローで100%、2030年までにストックで100%普及させることが計画されている。これは、照明のエネルギー消費量が、業務で21.3%、家庭で13.4%、産業でも6%を占め、高効率照明による削減余地が大きいためである。

また、主要国だけでなく、中国やインド等で白熱電球生産・販売停止が進められている。日本は、2012年に白熱電球の生産・販売を中止したが、欧州では2012年までに域内での販売が禁止され、米国が2014年、カナダでも2015年に販売禁止となった。さらに、インドは2012年に白熱電球の販売を禁止、韓国が2014年に、中国も2016年に販売が禁止される。このため、省エネルギーの観点だけでなく、白熱電球からの大量の買い替え需要が見込まれており、エネルギー効率の高いLED照明が求められている。

9.2. 国内の技術開発動向

9.2.1. 技術の概要

半導体を用いたSSL (Solid State Lighting) であるLED照明や有機EL照明は、ガラス原料や蛍光体、金属材料で構成される従来型の照明と異なる。SSLは半導体で構成され、プリント基板上に発光素子が実装されて照明器具に組み込まれる。



図 69 従来型照明とLED型照明の構造の差異

出所：経済産業省(2012)“LED照明産業を取り巻く現状”

(1) LED (Light Emitting Diode)

直接光に変換することにより発光する LED は、半導体基板や LED チップ、蛍光体で構成され、長寿命、低消費電力といった特徴を有する。しかし、半導体の製造コストが高く、従来型との照明と比較して価格が高いというデメリットがある。

(2) 有機 EL (Organic Electro Luminescence)

有機 EL は発光を伴う物理現象を利用した有機発光素子であり、既存の照明と異なる発光原理を利用した照明である。LED と同様に、次世代照明として期待されており、特に面光源として蛍光灯との置き換えが期待されており、大面積で薄型・軽量、拡散光源としての特質を有するが、短寿命で発光効率が劣るという課題がある

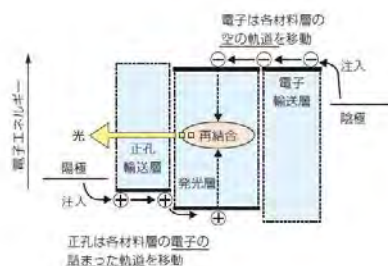
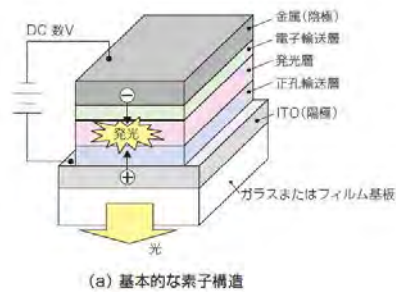


図 70 有機 EL の原理

出所：加藤（2014）“有機 EL の研究動向” NHK 技研 R&D/No.145/2014.

これらの 2 つの SSL は主に以下のような用途が想定されている。LED は、点光源としての特質を持ち白熱灯や電球などの置き換えが想定される。有機 EL は、面光源として特質をもち蛍光灯等の置き換えが想定される。



図 71 LED と有機 EL の主な用途

出所：NEDO(2014)「次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発」(事後評価) ”

9.2.2. 技術開発動向

国内では、2009年から2013年にNEDOが「次世代照明等の実現に向けた窒化物半導体等 基盤技術開発／次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発」を実施した。このプロジェクトでは、SSLの材料・デバイスの開発に主眼が置かれ、従来の白熱電球や蛍光灯を置き換える高効率照明として研究開発が行われた。

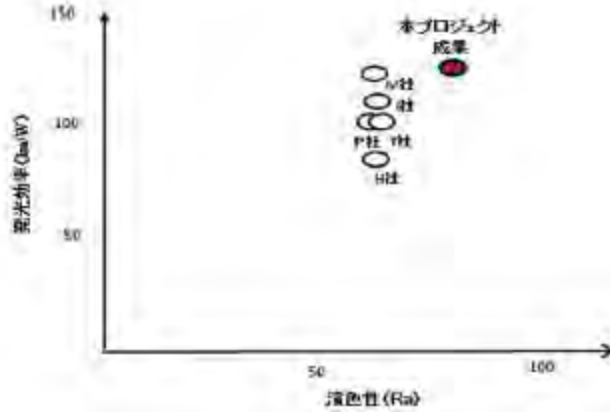
(1) LED (Light Emitting Diode)

現在最も普及しているサファイア基板を用いたLEDの発光効率は、原理上130~150lm/Wと想定されている。このため、NEDOプロジェクトでは、200lm/W以上の発光効率が期待できるGaN基板(窒化ガリウム)の生産効率を向上することで製造コストを低減し、これを用いた低コストLEDの開発が行われた。

この成果として、デバイスの発光効率で200lm/W以上を達成し、照明器具としてこれを用いた場合には133.81 lm/W¹³³が達成された。これを既存の製品と比較した場合が以下の図のように報告書に示されている。縦軸に照明器具の発光効率(lm/W)、横軸は演色性(Ra)¹³⁴である。

¹³³ 点光源LEDデバイス(LED基板と電極と蛍光体を組み合わせ封止材でパッケージ化した状態のデバイス)を、LED照明器具に加工する際には、面発光させるために光拡散をさせる必要があり、その際に光分散損が発生するためデバイス単体の効率よりも劣る。

¹³⁴ 基準光源による色彩の再現の忠実性を指数で表したもので、原則として100に近いほど演色性が良いと判断される。

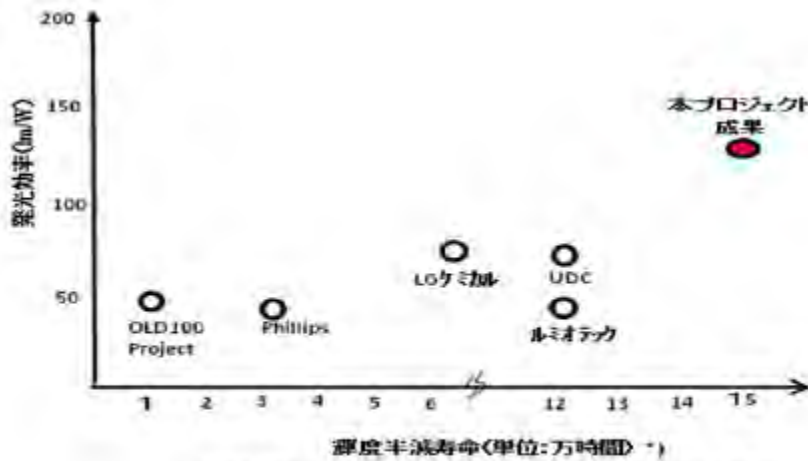


高輝度 LED 照明器具に関する成果の国際的な位置づけ

(2) 有機 EL (Organic Electro Luminescence)

高効率（発光効率 130 lm/W以上）高品質（平均演色評価数 80 以上、輝度 1,000 cd/m² 以上、輝度半減寿命 4 万時間以上）を実現するために、光取り出し方式、有機発光材料、白色光生成方式、製造プロセスなどの技術開発が行われた。

その結果、NEDO プロジェクトでは、発光効率で 133 lm/W、15 万時間の半減寿命を達成している。開発成果を海外と比較した場合の図を以下に示す。



*1) 輝度半減寿命=70%輝度寿命*3にて換算想定(70%輝度寿命のみ公表の場合)

図 III. 1. 2 有機 EL 照明に関する成果の国際的な位置づけ

有機 EL 照明に関する成果の国際的な位置づけ

一方で、海外では SSL の基盤となるチップや材料だけでなく、パッケージやモジュール、照明器具といった分野についても研究開発が行われている。例えば、欧州ではチップの開発と並行して、FP7 の下でパッケージ等の研究開発が行われている。

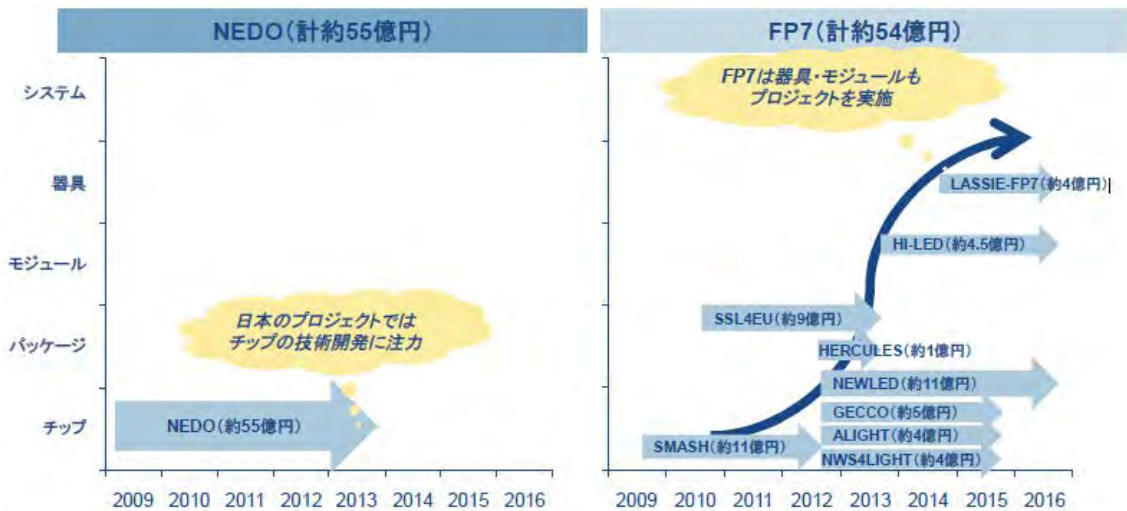


図 72 日本と欧州の SSL 開発動向の比較

出所：NEDO(2015) “次世代照明技術分野の出口戦略ロードマップの策定に関する調査”

9.2.3. 導入見込みの事例、市場規模

富士経済の調査¹³⁵によれば、国内の2014年の照明市場規模は8,629億円、2020年に7,756億円、2030年は5,549億円と徐々に縮小していくと予測されている。ただし、SSLの市場比率は引き続き上昇し、2014年は64%だが、2020年に87%、2030年には97%と予測されている。

世界市場は国内市場と異なり、2014年に8.53兆円、2020年に11.15兆円、2030年には15.93兆円となり、大きな成長が期待される分野である。加えて、SSLの比率が2014年に27%であるが、2020年に59%、2030年に81%と予測され、大きな成長が見込まれている。

したがって、飽和した国内市場だけでなく、海外市場をLEDや有機EL等の高効率照明で開拓することは、国内照明産業の活性化につながる可能性がある。

9.3. 主な国内企業

LED照明や有機ELに関連する企業は数多くあり、このうち主要な企業を図73と図74に示す。SSLが半導体を活用した証明であり、LEDチップや原材料を製造する企業とモジュールや照明器具を生産する企業に分かれる。

¹³⁵富士経済(2015) “Special Appli.光源／照明市場 実態・技術・予測 2015年版

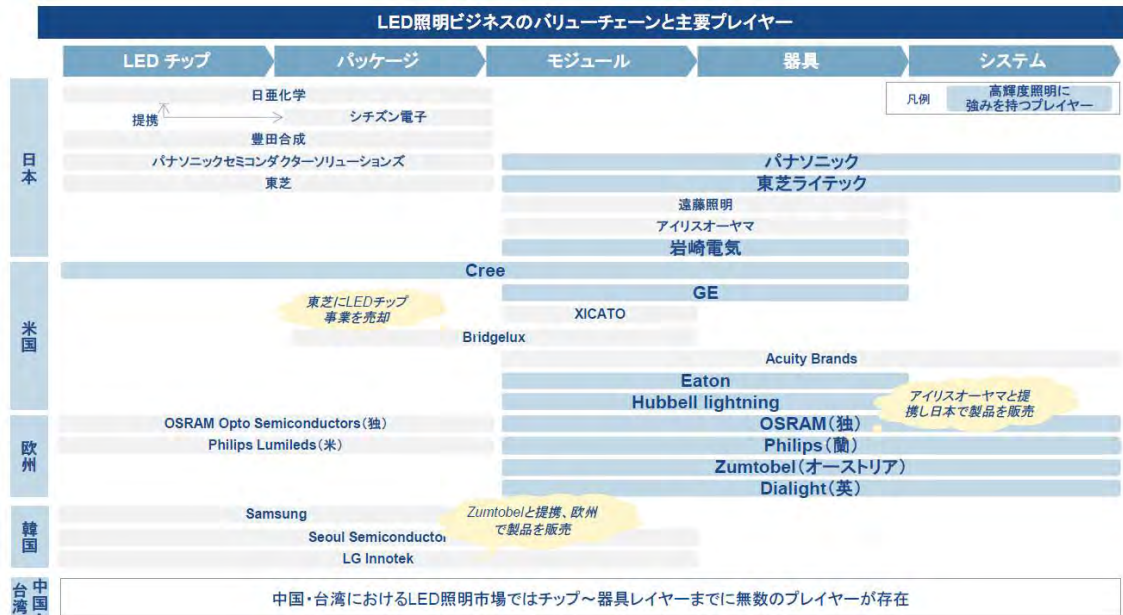


図 73 LED 照明のビジネスのバリューチェーン

出所：NEDO(2015)“次世代照明技術分野の出口戦略ロードマップの策定に関する調査”

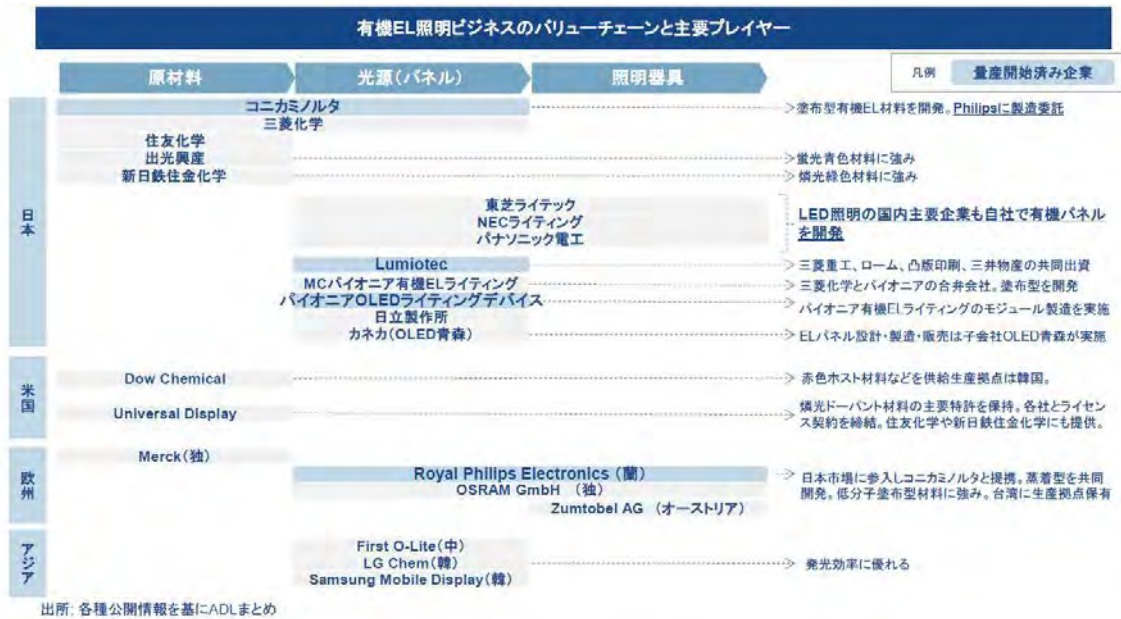


図 74 有機 EL 照明のバリューチェーン

出所：NEDO(2015)“次世代照明技術分野の出口戦略ロードマップの策定に関する調査”

その中で主要な企業の動向は下図の通りである。

		事業展開方向性パターン			
		① 性能向上・用途拡大	② ビジネスモデル革新	③ 付加価値多様化	国内・海外 プレイヤーの差異
日本	パナソニック	・	・ 2009年に買収したインドANCHOR社を通じて、アジアや中近東市場に参入する方針	・ 自社の家電事業とのシナジーを踏まえ、調光機能やHEMS等のシステム・ソリューション提案を強化	国内プレイヤーは「展開地域拡大」「川下側の強化」に注力
	東芝ライテック	・ 米Eridgelux社GaNoNSI技術を13年取得、低コスト・高輝度なLEDチップの開発を狙う	・ 2013年に北米市場での販路拡大を目指して米Green Star Productsを買収	・ リモコンやタブレット端末から照明の調光・調色が可能なシステムを開発・販売	
	NECライティング	・ 100形ハロゲン電球並みの最大光度を実現したLED電球を発売	・ LEDの保証期間を5年に延長	・ スピーカー内蔵LEDシーリングライトを販売 ・ 施設照明管理システム(人感センサ)販売	
	遠藤照明	・	・ 2014年に照明器具の卸売・輸入販売を展開する英国Ansell社を買収	・ 照明器具を専用のタブレット端末で制御可能な「SmartLEDZ」を2013年に販売	
	岩崎電気	・ 器具側の改良による高輝度照明の軽量化・高輝度化に注力	・	・	
米 海 外 欧 州	Cree	・ 2014年に台湾Lextar社と提携、チップ事業の更なる強化を狙う	・	・	海外プレイヤーは「M&Aによる用途拡大」「提携による海外販路確保」に注力
	GE	・	・ 2011年に店舗・屋外用照明でアイリスオーヤマと提携、日本でのシェア拡大を狙う	・	
	Philips	・ 博物館や医療用に特化した照明器具メーカーの買収により、製品ラインナップを拡大	・ 設備導入費を肩代わりする戦略で新興国でのシェア拡大を狙う/2014年に屋外・産業用照明でアイリスオーヤマと提携	・ スマートフォンから調光等が可能な「Philips hue」を販	
	OSRAM	・ 伊Clay Paky社の買収により、施設用の光色変化・調光システムを強化	・	・	
各プレイヤーの共通の取り組み		他の照明器具メーカーとの提携や買収による自社の技術力強化・製品ラインナップの拡充	他国メーカーとの提携による販路拡大/現地生産や設備導入費の肩代わりによる新興国への展開	川下のシステム・ソリューション事業の強化による他社との差異化	

図 75 主要 LED 照明企業における事業展開方向性

出所：NEDO(2015)“次世代照明技術分野の出口戦略ロードマップの策定に関する調査”

9.4. 他国の主な研究開発動向

(1) 欧州 FP7 (2009～2016)

欧州の研究助成資金である FP7 の下には、FP7/SMASH、FP7/SSL4EU、FP7/Hi-LED、FP7/NWS4LIGHT、FP7/LASSIE-FP7 といった LED の高効率化や製造コストの低減を目指すプロジェクトが並走しており、約 2 億 5 千万ユーロが研究開発資金として投じられており、130 lm/W、90 Ra が目標となっている。

また、同様に有機 EL に関連するプロジェクトも FP7 の下で活動しており、FP7/OLED100、FP7/FLEX-O-FAB、FP7/TREASURES といったプロジェクトが並走している。これらのプロジェクトの目標として、100 lm/W、10 万時間という目標が設定されている。

(2) 米国 DOE (2008～2014)、ARRA (2009～2019)

米国エネルギー省(DOE)が主導する LED 開発プロジェクトや、ARRA が主導する製造コストの低減、高品質化を目指すプロジェクトが実施されている。DOE のプロジェクトでは、2015 年に 200 lm/W、80 Ra という目標が設定されており、24 億 7200 万ドルを DOE が支出している。有機 EL についても DOE が主導する開発プロジェクトが実施されており、150 lm/W、15 万時間という目標が設定されている。このプロジェクトには、DOE から約 1 億 5 千万ドルが投じている。

10. 需給システム

10.1. スマートコミュニティ

10.1.1. 開発・導入の必要性

スマートコミュニティは、導入目的の違いから取り扱う分野が多岐に渡るとともに、国ごと地域ごとの環境やエネルギー事情、経済情勢等の特徴に応じてその取組が異なるため、世界共通の明確な定義はまだない。2014年4月11日に閣議で決定されたエネルギー基本計画では、スマートコミュニティを再生可能エネルギーやコージェネレーション等の分散型エネルギーを用いつつ、ITや蓄電池等の技術を活用したエネルギーマネジメントシステムを通じて、分散型エネルギー・システムにおけるエネルギー需給を総合的に管理し、エネルギーの利活用を最適化するとともに、高齢者の見守りなど他の生活支援サービスも取り込んだ新たな社会システムを構築したものと定義¹³⁶した。

また、国内外でスマートコミュニティ実証事業を積極的に取り組んでいる新エネルギー産業技術総合開発機構(NEDO)によると、スマートコミュニティを「進化する情報通信技術(ICT)を活用しながら、再生可能エネルギーの導入を促進しつつ、交通システムや家庭、オフィスビル、工場、ひいては社会全体のスマート化を目指した、住民参加型の新たなコミュニティ」と定義¹³⁷した。

スマートコミュニティの推進にあたっては、国や地域ごとに、導入の目的や背景は異なっている。例えば、欧州では、大量に導入されている太陽光発電や風力発電と既存の配電系統との連系がスマートコミュニティ推進の背景になっている。これに対して、米国の場合は、老朽化した送配電網の対策として、デマンドレスポンスの実現がスマートコミュニティ導入の大きな目標の一つである。新興国においては、急速な経済発展を受け、エネルギーの効率的な利用促進や人口増加に伴う都市への人口集中に対応するための環境負荷低減を目指したスマートな都市作りのためのプロジェクト等が実施されている。

我が国においては、2010年6月18日に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、スマートグリッドの整備やスマートメーターの設置、国内外での次世代エネルギー・社会システム実証事業の実施、スマートコミュニティの構築に向け様々な取組が打ち出されている。東日本大震災とこれに伴う原子力発電所事故を契機として、エネルギー供給の制約や集中型エネルギー・システムの脆弱性が顕在化した。こうした状況を背景に、集中型電源のみならず分散型エネルギー・システムも含めた多様なエネルギー源を活用した安定供給の確保、ITや蓄電池等を活用したエネルギー管理システムによるスマートなエネルギー消費の実現を図ること、つまりスマートコミュニティの構築の必要性が益々高まっている。

2010年4月に、官民連携組織「スマートコミュニティアライアンス」が設置され、国内外での実証事業の実施、わが国が強みとする省エネルギー・新エネルギー技術の競争力に直結する国際標準化の策定等に取り組んでいる。事務局はNEDOが務めている。参加企業は、電力、重

¹³⁶ 経済産業省、次世代エネルギー・社会システム協議会（第18回）公開資料（2016年6月7日開催）。

¹³⁷ NEDO（2014）再生可能エネルギー技術白書 第10章スマートコミュニティ

電・機器メーカー、IT、不動産ディベロッパー、大学、研究機関、自治体など約300社から構成され（2016年6月現在）、国際戦略ワーキンググループ（WG）、国際標準化WG、ロードマップWGとスマートハウス・ビルWGの4つのWGの活動を中心に進めている¹³⁸。

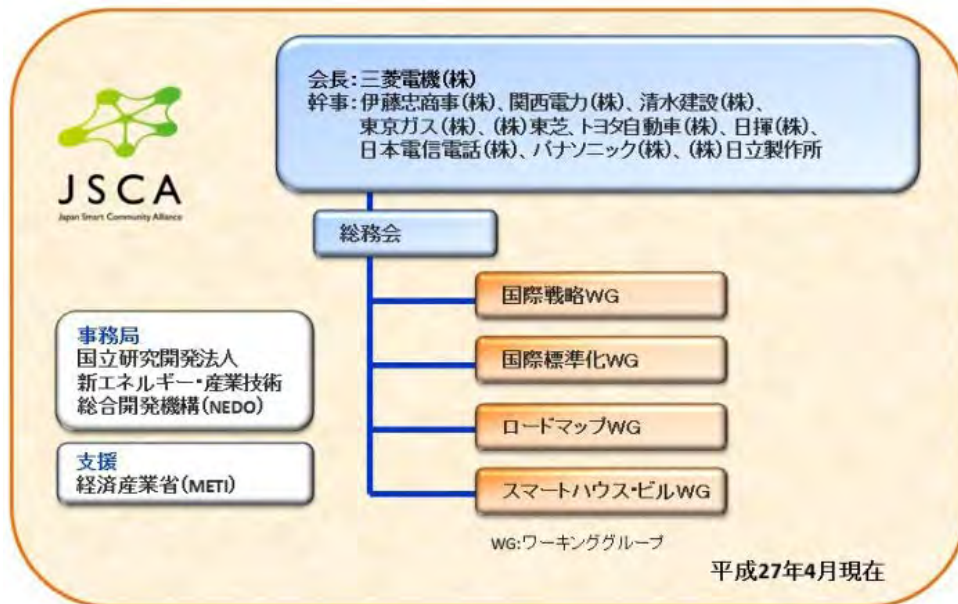


図 76 スマートコミュニティアライアンスの組織図

出典：JSCA ホームページ

NEDO（2014）によると、日経BPでは2030年の市場規模は約230兆円とされており、富士経済では2020年の市場規模が40兆円とされており、大きな違いがある。とはいえ、どの予測からも、今後市場の急速な立ち上がりや蓄電池利用の重要性を指摘している¹³⁹。

10.1.2. 国内の技術開発動向

(1) 技術の概要

スマートコミュニティは、再生可能エネルギーの有効利用や効率的に電力を供給する次世代送電網（スマートグリッド、詳細は「スマートグリッド」を参照）や、電気自動車やITを活用した交通システムと情報ネットワークを融合した次世代社会インフラであると同時に、省エネ家電やスマートメーターを活用するスマートハウス、デマンドレスポンス等によるエネルギーの効率的な利用促進（詳細は「デマンドレスポンス」を参照）、快適性向上とCO2排出量削減を実現するための新しい街づくりの構想といえる。その構築には、目的に応じて様々な要素技術を統合していく必要がある。図77、表32にそれぞれ特に重要なものと各要素技術の概要を示す。

¹³⁸ JSCA ホームページ <https://www.smart-japan.org/about/index.html#3>

¹³⁹ NEDO（2014）再生可能エネルギー技術白書 第10章スマートコミュニティ

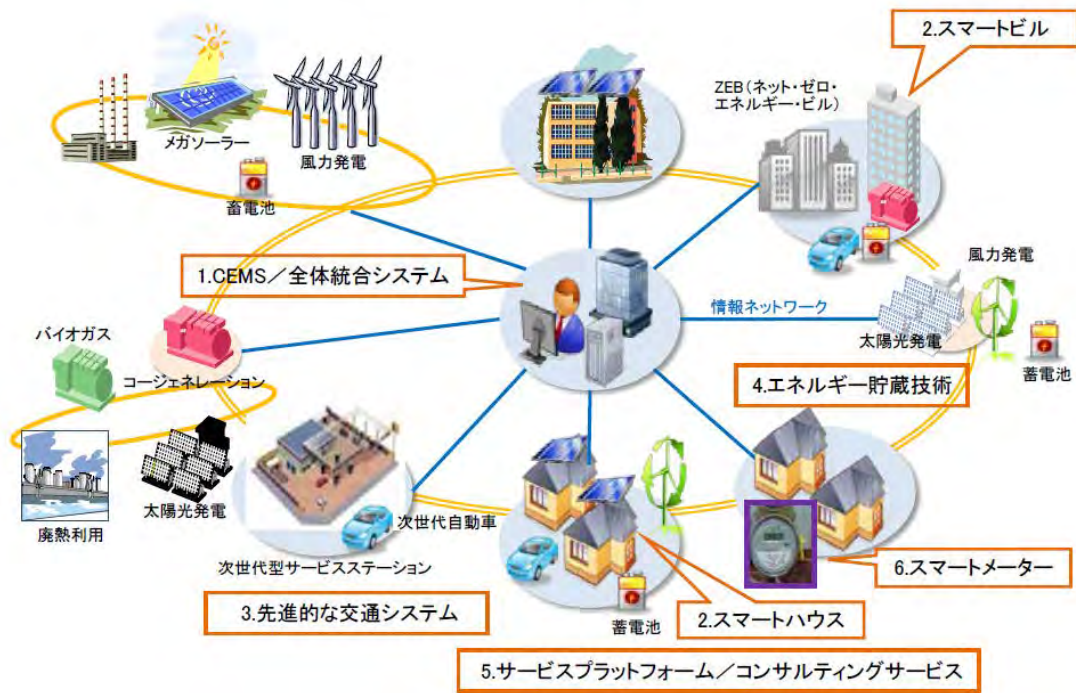


図 77 スマートコミュニティを構築するための様々な要素技術
出典：JSCA パンフレット

表 32 各要素技術に関する概要

1. CEMS/全体統合システム	地域エネルギーマネジメントシステム（Community Energy Management System）。電力系統・配電、地域における分散電源、各需要家をICTで結び、電力品質の確保、省エネルギー化、そしてピークシフトによるCO2削減を両立させるための、全体最適を行うシステムである。
2. スマートビル	エネルギーマネジメントシステムを使ってエネルギー消費が最適に制御された住宅・ビル・工場。これらのエネルギーマネジメントシステムは、CEMSによって情報が統合され、社会システム全体での最適な運用が実現する。
3. 先進的な交通システム	電気自動車（Electric Vehicle、EV）などの環境負荷の低い輸送手段。これらの輸送手段の普及のためには、充電スタンド等のインフラの整備や、エネルギーマネジメントへの統合手段としてのV2G（Vehicle to Grid）、V2H（Vehicle to Home）といった技術の確立が必要。
4. エネルギー貯蔵技術	蓄電池などのエネルギー技術は、電力供給の安定化や再生可能エネルギーの統合を最大化する技術である。
5. サービスプラットフォーム/コンサルティングサービス	スマートコミュニティの構築は、一組織によってできるものではなく、国地域ごと多様なニーズを踏まえ、複数のステークホルダが協力して取り組んでいくこととなる。このため、スマートコミュニティで展開される各サービスに共通する機能を備えたプラットフォームや、スマートコミュニティの普及促進のためのコンサルティングサービスを提供する。
6. スマートメーター	電力などのエネルギー使用量をデジタルで計測し、電力・ガス会社と需要家など双方向の通信機能を持つ。自動検針やエネルギー消費量も見えるかを可能にし、ホームエネルギーマネジメント機能等も有する。スマートグリッドの構築には欠かせない技術であり急速に普及が進んでいる。

※CEMS のほか、住宅向けのエネルギーマネジメントシステム（Home Energy Management System、HEMS）；商業ビル向けのエネルギーマネジメントシステム（Building Energy Management System、BEMS）；工場向けのエネルギーマネジメントシステム（Factory Energy Management System）がある。CEMS は、これらを含んだ地域全体向けのエネルギーマネジメントシステムとなる。

※V2H とは、EV などの自動車が蓄電池に蓄えた電力を家庭で使う仕組みのこと。具体的には、停電や電力消費のピーク時に EV から住宅へ電力を供給することを想定している。

※V2G とは、電気自動車を電力系統に連系し、再生可能エネルギー電源の出力が急激に落ち込んだ時などに、車と系統との間で電力融通を行うこと。

出典：JSCA パンフレット、三菱電機情報、各資料より作成。

(2) 主要な国内実証事業

日本におけるスマートコミュニティの代表的なプロジェクトとして、2010年4月から2015年3月までに実施された4つの実証事業「次世代エネルギー・社会システム実証事業」が挙げられる。この事業は、エネルギーマネジメントシステムの実証にとどまらず、交通システムやライフスタイルの変革等の各種実証項目を含む国内実証事業である。実証地域として、全国19地域からの応募から、横浜市、豊田市、けいはんな学研都市（京都府）と北九州市が選定された。

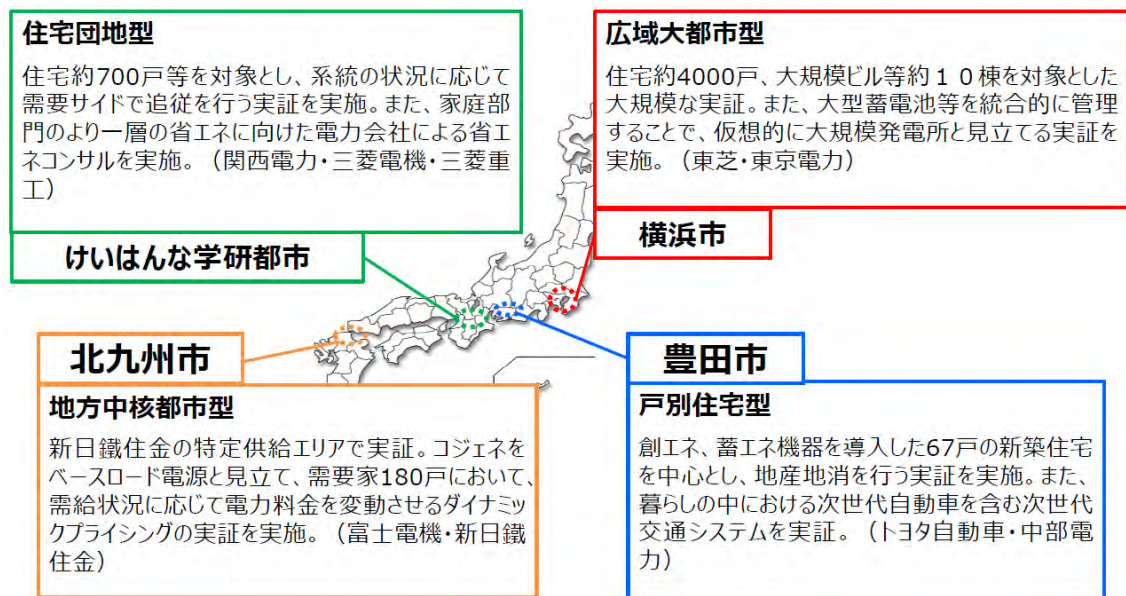


図 78 4 地域実証の概要

出典：第18回次世代エネルギー・社会システム協議会資料（2016年6月7日開催）

表 33 に各実証事業の概要と主な実施内容をまとめる。これらの実証事業は、2015年3月で終了し、CO₂の削減や需要ピークの削減等の成果が得られた。また、スマートコミュニティの構築に欠かせない基盤技術の確立やデマンドレスポンス等の需要制御技術の実証のほか、様々な機器と機器、システムとシステムを接続するインターフェイスの標準化も進めており、国内外におけるスマートコミュニティ推進の更なる展開につながることを期待されている。

表 33 各実証事業の概要と主な実施内容¹⁴⁰

横浜市	
対象	住宅約4000戸、大規模ビル等約10棟
推進体制	横浜市、東芝、パナソニック、明電舎、日産、アクセンチュア等
主な実施内容	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー需要が異なる地域（商業、住宅、工業地区）間でエネルギー需要を最適化させるCEMSを中心に、HEMS、BEMS、EV、蓄電池SCADA（Battery Supervisory Control and Data Acquisition）等を最適に連携させることにより、天候に左右される太陽光発電の不安定さを吸収する等、再生可能エネルギーを大量導入しやすいインフラの構築に取り組む。 大規模商業施設、オフィスビル等の大口需要家並びに家庭を対象にしたデマンドレスポンス実証を実施。
	<ul style="list-style-type: none"> 大規模商業施設、オフィスビルのデマンドレスポンスで15%程度のピークカットを達成 需要家側蓄電池、集配信システム、需給調整用蓄電池を監視制御し、系統との協調を図る蓄電池SCADA（Battery Supervisory Control and Data Acquisition）を開発
豊田市	
対象	戸別住宅67世帯
推進体制	トヨタ自動車、中部電力、東邦ガス、東芝、三菱重工、デンソー、シャープ、富士通、ドリームインキュベータ等
主な実施内容	<ul style="list-style-type: none"> 次世代自動車に焦点を絞り、暮らしの中での次世代自動車の使い方の大規模な実証を実施 デマンドレスポンスを実証を実施
	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー情報マネジメントシステム（EDMS）からのサービス提供により、EDMS未導入世帯に比べて15～25%程度のCO₂削減を達成
けいはんな学研都市	
対象	住宅約700戸
推進体制	京都府、関西電力、大阪ガス、関西文化学術研究都市推進機構、
主な実施内容	<ul style="list-style-type: none"> 電力制御機能を付加したスマートタップを各家電に取り付け、消費を見えるか。エネルギーの供給に応じたデマンドレスポンスを実施。 家庭内の機器の買い替えアドバイス等の省エネコンサルテーションを実施
	<ul style="list-style-type: none"> 家庭需要家700軒を対象としたデマンドレスポンスで、約2割のピークカットを達成

※スマートタップとは、コンセントにつながっている機器が消費している電力量を計測する機能を持つ機器である。

¹⁴⁰ JSCA パンフレット、NEDO（2014）再生可能エネルギー技術白書 第10章スマートコミュニティより作成。

北九州市	
対象	新日鉄住金の特定供給エリアの70企業、200世帯
推進体制	北九州市、富士電機システム、GE、日本IBM、新日鉄等
主な実施内容	<ul style="list-style-type: none">・ デマンドレスポンス(ダイナミックプライシング)を実施・ HEMSによるエネルギー制御、BEMS、デマンドサイドマネジメントを統合したエネルギー管理システムを実証
主な成果	<ul style="list-style-type: none">・ ダイナミックプライシングの提供により、一般的な従量電灯契約の仮定に比べて18~22%のピークカットを達成

(3) 海外での主な実証プロジェクト

我が国が海外で実施している実証事業として「国際エネルギー消費効率化等技術・システム実証事業」がある。現在、米国（ニューメキシコ、ハワイ）、フランス（リヨン）、スペイン（マラガ）、インドネシア（ジャワ）などにおける実証事業が実施されている。

次に各実証事業の概要をまとめる。

表 34 海外での主な実証プロジェクトの概要と主な実施内容¹⁴¹

米国（ニューメキシコ州）	
推進体制	NEDO、清水建設、東芝、日立、京セラ、シャープ、日本ガイシ、日本電気、明電舎、富士電機、東京ガス、三菱重工業、など ニューメキシコ州、ロスアラモス国立研究所、サンディア国立研究所、ニューメキシコ州立大学、ニューメキシコ電力会社、MDS
対象	①ロスアラモス（同州で最も小さい郡、人口約2万人）
背景	天候に左右されやすい太陽光発電の導入比率が高い系統を安定して運用するためには、蓄電池システムやその他のエネルギーとの組み合わせが重要になる
目的	蓄電池システムとデマンドレスポンスを組み合わせることで、系統側の蓄電池容量の最適化を図る。また、リアルタイムプライシング（デマンドレスポンスの一つ）を最大限に利用できる先進的なスマートハウスの構築を目指す
主な実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ・ HEMS、太陽光発電システム、蓄電池、ヒートポンプ給湯器を備えたスマートハウスの建設とデモンストレーション ・ リアルタイムプライシングによるデマンドレスポンスの実証 ・ 太陽光発電システムを大量に導入した際に必要な蓄電池容量の最適化を行う
対象	②アルバカーキ（同州最大の商工業都市、人口約48万人）
背景	再生可能エネルギーの導入に伴う系統の安定化と同時に、非常時には電力系統から切り離して、自立運転可能な商業ビルが求めら
目的	大型機器の新設が困難な都市部のうち、特に商業地域の商業ビルをスマートビル化することで、経済性と環境性を両立させたスマートコミュニティに相応しいビル運用を実証する
主な実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ・ 商業ビルに、太陽光発電システム、ガスエンジンコージェネ、燃料電池、BEMS、蓄熱蓄電システムを設置し、電力系統から切り離されても自立運転可能なビル運用システムを実証 ・ 系統内の太陽光発電の出力変動をビル内設備を制御することにより吸収させる技術の確立を検証

¹⁴¹ NEDO や JSCA 各資料より作成。

米国（ハワイ州）	
対象	マウイ島、人口約10万人
推進体制	NEDO、日立製作所、みずほ銀行、サイバーディフェンス研究所 ハワイ州、マウイ郡、ハワイ電力、ハワイ州立大学
背景	燃料の海外輸送に伴うリスクやコスト高といった離島ならではの課題を対応するため、風力等の再生可能エネルギーを積極的に導入しているが、風力発電は気候によって出力が変動するため、配電網への影響が懸念されている
目的	再生可能エネルギーの変動を吸収できるスマートグリッドの実証を行うことで、再生可能エネルギーを最大限に利用する技術を検証する
主な実施内容	<ul style="list-style-type: none"> EV充電マネジメントを中心とする需要マネジメントを実施可能とする離島型スマートグリッドを構築することで、電力需要のピークシフト、主に夜間の余剰風力対策、再生可能エネルギー発電の変動対策による問題解決を図る

フランス（リヨン市）	
対象	リヨン市、人口は100万人を越える
推進体制	NEDO、東芝、東芝ソリューション ぐりんリヨン共同体、リヨン開発公社、ブイグ、トランスデブ、プロキシウエイ、グランドリヨンハビタ住宅供給公社
背景	欧州では、2020年までに再生可能エネルギーの比率を20%にまで高めることなどを定めた「トリプル20」という環境目標がある。フランスでは、さらに2020年以降に新築するビルは、ビル全体で消費するエネルギーよりも多くのエネルギーを生み出す「ポジティブエナジビルディング（PEB）」とすることが求められている
目的	新築されるPEBの実証に加え、既存の古い住宅における省エネルギー対策の実証を実施。また、人口や交通量の増加によるCO2排出量の増加への対策としてEVのカーシェアリングシステムを導入し、検証する
主な実施内容	<ul style="list-style-type: none"> 再生可能エネルギーや蓄電池などを積極的に導入し、ビル内のエネルギー消費量を上回るエネルギーを生み出すPEBを建設 太陽光発電を活用したEV充電管理システムとEVカーシェアリングを導入 既存の住宅におけるエネルギー消費量の見えるかによる、住民の省エネ行動を促す 各実証で収集されるエネルギー情報をとりまとめ、地域全体で活用するための指標を提示するCEMSを構築する

スペイン（マラガ市）	
対象	リゾート地で、約60万人の人口を擁するスペイン第6位の都市
推進体制	NEDO、三菱重工業、三菱商事、日立製作所 マラガ市、エンデサ、テレフォニカ、アイエサ
背景	スペインでは、エネルギー消費量の約40%が交通分野によるもので、そのほとんどが化石燃料であるという特徴がある。欧州環境目標の「トリプル20」を達成するために、スペインでは2014年までに25万台のEVを導入する予定
目的	都市部でのEVの大量導入を想定した実証を実施
主な実施内容	<ul style="list-style-type: none"> EV管理システム、充電インフラの整備、情報・ナビゲーションサービスの実証を行う 電力マネジメントシステムまでを含めた、EVの大量導入・普及に対応できるインフラ設備を構築する

インドネシア（ジャワ島）	
対象	スルヤチプタ工業団地
推進体制	NEDO、住友商事、富士電機、三菱電機、NTTコミュニケーションエネルギー鉱物資源省、電力公社（PLN）、スルヤチプタ工業団地 など
背景	インドネシアは高い経済成長が続き、エネルギー需要も著しく伸びており、電力の品質や電力不足問題で、停電が頻繁に起こっている。現地生産を行っている日本企業の多くは、停電による生産効率の低下や機器の損傷等のリスクを低減するために自家発電設備を導入している。
目的	電力品質の安定化やエネルギーの効率的な利用するシステムを構築する
主な実施内容	<ul style="list-style-type: none"> 配電自動化システムの導入により停電時間の短縮を図ると共に、無停電電源装置や電圧安定化装置を導入し、周波数や電圧の変動のない高品質電力を供給するシステムを構築 FEMSを導入し、エネルギーの効率的な利用を促進する。同時に、デマンドサイドマネジメントを導入する エネルギーマネジメントの実施のために、工業団地内に高品質な通信インフラを敷設し、共通基盤となるICTプラットフォームを構築する

10.1.3. 主な国内企業

スマートコミュニティを可能とする技術開発に向けて、日本の企業がこれまで構築してきた具体的な事例を表 35 にまとめる。

表 35 スマートコミュニティの構築に向けた日本企業の取組みの事例¹⁴²

取組	企業
CEMS/全体統合システム	
（ハワイ）日米共同の島嶼スマートグリッド実証事業	株式会社日立製作所
（英国）グレーターマンチェスター実証	株式会社日立製作所
マイクロエナジーマネジメントシステム・ μ EMS	株式会社東芝
人とエネルギーの調和を実現する日揮情報システムのエネルギーマネジメントシステム（EMS）：J+EMSherpa	日揮情報システム株式会社
スマートコミュニティがめざす未来	株式会社 NTT ファシリティーズ
工業団地のスマート・エネルギー・マネジメント	清水建設株式会社
既成市街地のスマート化ソリューション	清水建設株式会社
熱源最適制御システム「Energy Quest」	新日本空調株式会社
電力管理システムとポイントサービス	株式会社ライフネット
水素社会を拓く「つくる」「つかう」「つながる」技術	本田技研工業株式会社
スマートハウス/スマートビル	
スマート BEMS	株式会社東芝
統合 BEMS	株式会社東芝

¹⁴² JSCA（2015）スマートコミュニティ 日本企業の取組み

ホームソリューション	株式会社東芝
Fujisawa サステイナブル・スマートタウン	パナソニック株式会社
集合住宅におけるエネルギーマネジメント	東京ガス株式会社
スマートグリッドと PHV 連携による ADR 実証	トヨタ自動車株式会社
スマートマンションソリューション	三菱電機株式会社
横浜スマートシティプロジェクト 商業施設向けエネルギーマネジメントシステム (EMS) 実証	日揮グループ
LoCas-1「電力使用量の見える+需要予測」	株式会社アーク情報システム
戦略経営に効果的なエネルギーデータ活用 Enetune-BEMS	富士通株式会社
発電ロスの早期発見による機会損失防止 Venus Solar	富士通株式会社
スマートビル (マイクログリッド、スマート BEMS)	清水建設株式会社
ZEB (ゼロ・エネルギー・ビル)	清水建設株式会社
先進的な交通システム	
次世代交通システム : Ha:mo 実証	トヨタ自動車株式会社
エネルギー貯蔵技術	
スマートバッテリー	株式会社東芝
バッテリーキャパシタハイブリッド蓄電システム	日揮グループ
スマートエネルギーを支える技術	日本電気株式会社
サービスプラットフォーム/コンサルティングサービス	
IBM サービスディバリープラットフォーム (SDP)	日本アイ・ビー・エム株式会社
スマートコミュニティ・コンサルティングサービス	株式会社 NTT データ経営研究所
Eco kaizen	アイフォーコム・スマートエコロジー株式会社
Net Optimizer with EXPRIMG (風力専用送電線最適計算プログラム)	株式会社アーク情報システム
スマートコミュニティを支える重要技術/製品の安全性検証をサポート	株式会社 UL Japan
スマートエネルギー関連の分析サービス	株式会社住化分析センター
スマートメーター	
スマートメーターシステム	三菱電機株式会社
スマートメーター “SmaMe-II-TypeH”	東光東芝メーターシステムズ株式会社

(1) 東芝

東芝グループは、横浜スマートシティプロジェクト、フランスリヨン再開発地域におけるスマートコミュニティ実証事業、中国・江西省共青城市におけるスマートコミュニティ技術実証事業等、国内外で既に 30 以上ものスマートコミュニティプロジェクトに参画してノウハウを蓄積している。2013 年、スマートコミュニティ事業体制の強化を目的に、神奈川県川崎市に

「株式会社東芝 スマートコミュニティセンター」¹⁴³を設立した。グループ会社を含む社会インフラ部門やクラウドソリューション部門などスマートコミュニティ事業に関連する部門を集結し、シナジー効果を発揮するとともに、川崎周辺に位置する研究所、社会インフラ部門の工場とも連携強化を図ることで、スマートコミュニティ事業のグローバル展開を加速していく。また同センターは、スマートビルを構成する最先端のシステムや技術をわかりやすく展示・紹介するショールーム機能も担っている。

(2) 三菱電機

三菱電機は、自然エネルギーの最大利用も含めたエネルギーのベストミックスをベースに、電力品質の安定供給を図るスマートグリッドの実現と、コミュニティ全体におけるエネルギーの最適化により、安全で豊かな生活の両立を目指す「eco 電化コミュニティ」というコンセプトで取り組んでいる。スマートグリッドへの取組として、太陽光発電が大量導入される2020年の送配電網を模擬し、様々な課題やその対応策を検討するために、尼崎・和歌山・大船の3つの地区に実証実験設備を構築し、2010年に一部実証実験を開始した¹⁴⁴。2011年2月からは、スマートコミュニティに関する取組に加えて、東日本大震災の影響による新たな社会的要請を踏まえた「低炭素で経済的かつ信頼性の高い電力系統の実現」「需要家での見える化と制御によるエネルギー最適利用の実現」「緊急時にも対応した堅牢なエネルギーインフラの実現」という3つのテーマを追加し、更に取組を強化していく¹⁴⁵。

10.1.4. 他国の主な研究開発動向

先進国のみならず、新興国においてもスマートシティやエコシティといった新たな次世代都市インフラシステム構築に向けたプロジェクトが多数実施されている（

¹⁴³ https://www.toshiba.co.jp/about/press/2013_10/pr_j3101.htm

¹⁴⁴ 三菱電機（2010）スマートグリッド事業について

¹⁴⁵ http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/eco_sp/smart/index.html

表 36)。これらのプロジェクトは、温暖化防止対応策として都市の CO2 排出量の削減や再生可能エネルギーの利用促進、エネルギーや廃棄物の流れをより効率的に管理する街づくりが展開されている。実施内容は、スマートメーターの単なる設置といった初期段階から、エネルギー消費の効率化を目的としたデマンドレスポンスの実証に重点が移っており、または特定分野例えばエネルギー、建物、交通などのスマート化する試みが増え始めている。

表 36 主な次世代都市インフラシステムの構築プロジェクト¹⁴⁶

コンセプト	国・都市	備考
スマートシティ (Smart City)	テキサス州オースチン市(米国)	ピーカンストリートプロジェクト。テキサス州オースチンで展開されているスマートグリッドの多くの要素を含めた実証。1000軒を超える規模のデマンドレスポンス管理実証が特徴
	ドイツ・マンハイム市(ドイツ)	ドイツE-Energyプロジェクトの一つ。エナジーバトラー(執事)と呼ばれるゲートウェイを1000軒単位に導入しての自動デマンドレスポンス実証が特徴
	ニーズ(フランス)	オランジュ社とニースコートダジュール都市圏連合が展開するがITを利用した水や電気などの消費効率化や大気汚染監視などを行う実証実
	マラガ(スペイン)	環境都市の実現を目的にした。スマートグリッド技術の実証実験のちに、NEDOのマラガプロジェクトと連携している
	サウスウェルズ州(オーストラリア)	シドニー、ニューカッスルなど、サウスウェルズ州の都市で展開される、CO2削減に向けたスマートグリッド技術の実証実験
	ボーンホルム(デンマーク)	EcoGrid EUプロジェクトという、EUの合同実証。再生可能エネルギーの割合が50%を上回る実際の電力系統で行うデンマークボーンホルム島における本格的な実証実験
エコシティ (Eco City)	天津他12都市(中国)	天津市をはじめとした中国国内合計13都市で、環境都市を建設する計画。再生可能エネルギー導入のみならず、地域熱供給、資源循環、その他省エネルギー技術の導入を目指す
	上海市他(中国)	英国建設コンサルティング会社のARUP社がまとめた一プランを作成。上海市の東灘地区の他に複数の都市で計画。サステナブルな都市作りを目指す
環境共生都市	ストックホルム他(スウェーデン)	Symbio City。ストックホルム郊外のハマビーショースタッドでの再開発で成功した自然資源、エネルギー、廃棄物の流れを閉鎖型にする街づくりを展開
CO2ニュートラル都市	マスダール(UAE)	Masdar City。必要な電力を100%再生可能エネルギーで賄う街づくりを開始

(1) 米国

米国では、老朽化した送配電網の改善策として、デマンドレスポンスの実現がスマートコミュニティ導入の大きな目標の一つである。オバマ政権下で2009年に制定されたアメリカ再生・再投資法(American Recovery and Reinvestment Act, ARRA)よりスマートメーターの設置やデマンドレスポンスの実施など、スマートグリッド関連の様々なプロジェクトが推進されている(詳細は「スマートグリッド」を参照)。

米国がスマートシティ¹⁴⁷開発に本腰を入れ始めたのは、オバマ大統領が2015年9月に発表した「スマートシティイニシアティブ」がきっかけである。同イニシアティブの下で、スマートシティの実現に必要な要素技術の研究開発に対し、2016年度の連邦予算において1億6000万ドル(約192億円)の政府助成を行うとした(表37)¹⁴⁸。スマートシティの構築に必要な共通的な要素技術、特にIoT(Internet of Things、モノのインターネット)関連のアプリケーションや自動車の自動運転など先端技術の研究開発が重視されている。対象とする各研究プロジェクトは、企業、大学、研究機関と自治体がペアを組んでスマートシティ構築に協力していくこととなっている。2015年9月のプレス発表では21組のペアが発表された。さらに2016年度中

¹⁴⁶ NEDOやJSCA各資料より作成。¹⁴⁷ 米国では、日本と異なり、スマートシティといった言葉を使っている。¹⁴⁸ <https://www.whitehouse.gov/the-press-office/2015/09/14/fact-sheet-administration-announces-new-smart-cities-initiative-help>

に 60 組以上のペアを編成する予定である。

表 37 米国政府の助成金内訳¹⁴⁹

府省	助成金額
国立科学財団(National Science Foundation、NSF)	スマートシティの研究基盤の構築に4500万ドル
米国国立標準技術研究所(National Institute of Standards and Technology、NIST)	
国土安全保障省(Department of Homeland Security)、輸送省(Department of Transportation)	安全、エネルギー、気候変動対応、交通、ヘルスケアなどの分野に1億1500万ドル
エネルギー省(Department of Energy、DOE)、商務省(Department of Commerce)	
環境保護庁(Environmental Protection Agency、EPA)	
合計	1億6000万ドル

(2) ヨーロッパ

EU では、システムの安定性を確保しつつ再生可能エネルギーの導入量を増やすため、これまでスマートグリッドに関する R&D や実証事業が多数実施されている（詳細は「スマートグリッド」を参照）。スマートコミュニティの推進のため、2011 年に「スマートシティ・スマートコミュニティ産業界イニシアティブ」を発足させ、7500 万ユーロの予算を充てて輸送とエネルギー分野の実証事業への助成が始まった。2012 年 7 月に、同イニシアティブの後継の取組みとして、新たに情報通信分野を含む、「スマートシティ・コミュニティ欧州イノベーション・パートナーシップ」(European Innovation Partnership for Smart Cities and Communities) を立ち上げるとともに、都市におけるエネルギー、交通、情報通信分野のスマート技術開発を支援するための指針を発表した。諸技術開発支援のための予算は 3 億 7500 億に大幅に増大した¹⁵⁰。

また、第 7 次研究枠組み計画 (Framework Programme、FP7) の下、10 のスマートコミュニティ・スマートシティパイロットプロジェクトに対し、累積で約 1 億 2294 万ユーロの支援が行われた。各プロジェクトには、それぞれ 2 から 14 都市が参加している。表 38 に各パイロットプロジェクトの概要を示す。

現在では、2013 年末に終了した FP7 の後継となる研究・イノベーションプログラム「ホライゾン 2020 (Horizon 2020)」(2014 年から 2020 年まで) が立ち上げられた。同プログラムの下で、エネルギー分野 (スマートシティを含む) に累計約 60 億ユーロ、スマートな統合型グリ-

¹⁴⁹ JSCA Newsletter 特別版 20160229 (No29) “「スマートシティ」推進に動く米国オバマ政権要素技術開発とイノベーション加速を狙う” を引用。

¹⁵⁰ http://ec.europa.eu/eip/smartcities/timeline/index_en.htm

ン運輸（電気自動車など）に累積約63億ユーロの¹⁵¹予算が充てられている。

表 38 各パイロットプロジェクトの概要¹⁵²

1. ZenN (Nearly zero energy neighborhoods)	
実施期間	2013年3月～2017年2月
予算	15,677,564ユーロ
概要	ほぼゼロエネルギー地区。地区全体の建物をゼロエネルギー消費の仕様に改修する
2. R2Cities (Residential Renovation towards nearly zero energy Cities)	
実施期間	2013年7月～2017年6月
予算	14,861,751ユーロ
概要	ほぼゼロエネルギー都市を目指して大規模地区で住居を改修。高エネルギー効率の住居のデザイン、建築、管理に関する戦略を立て実行する
3. PITAGORAS (Sustainable urban planning with innovative and low energy thermal and power generation from residual and renewable sources)	
実施期間	2013年11月～2017年10月
予算	14,357,143ユーロ
概要	イノベーションとともに、剰余資源と再生可能資源からの発電や低エネルギーの熱利用を行う持続可能な都市計画。具体的には、工業地帯の排熱を利用して都市部の地域暖房とするなど、エネルギー効率が良く、費用対効果の高いエネルギーシステムを提供する
4. CELSIUS (Combined efficient large-scale integrated urban system)	
実施期間	2013年4月～2017年3月
予算	26,009,670ユーロ
概要	副次的に生まれたが未利用で廃棄されているエネルギーを、地域暖房や地域冷房などに活用する
5. InSMart (Integrative smart city planning)	
実施期間	2013年12月～2016年11月
予算	2,629,866ユーロ
概要	統合的なスマートシティ計画。自治体、研究機関、産業界と協力して、短・中・長期的に持続可能なエネルギーの未来を経済、環境、社会的指針の下に実現する
6. STEEP (Systems thinking for efficient energy planning)	
実施期間	2013年10月～2015年9月
予算	2,634,773ユーロ
概要	エネルギー効率化計画の思考システム。低炭素社会とエネルギー効率化を目指して、エネルギーマスタープランを作成する
7. EU-Gugle (European cities serving as green urban gate towards leadership in sustainable energy)	
実施期間	2013年4月～2018年3月
予算	30,140,289ユーロ
概要	ほぼゼロエネルギー建物への改修など、グリーン都市への再開発モデルを目指し、技術、社会経済、財政のバランスを考えて地元のニーズにあった解決策を探る
8. STEP UP (Strategies towards energy performance and urban planning)	
実施期間	2012年11月～2015年4月
予算	4,692,275ユーロ
概要	エネルギーパフォーマンスと都市計画を目指す戦略。持続可能なエネルギープランと低炭素エネルギープロジェクトのプログラムを策定する
9. PLEEC (Planning for energy efficient cities)	
実施期間	2013年4月～2016年3月
予算	4,490,717ユーロ
概要	省エネルギー都市の計画。欧州のエネルギー消費を減らすことを目的に、エネルギー効率化と持続可能な都市計画のモデルを作る
10. TRANSFORM (Transformation agenda for low carbon cities)	
実施期間	2013年1月～2015年6月
予算	7,445,114ユーロ
概要	低炭素都市への転換を目指す。CO ₂ 削減と再生可能エネルギーの推進、エネルギー効率向上など低炭素エネルギーの野心的な目標を立てている

¹⁵¹ European Commission, "Horizon 2020 in Brief," 2014, p.13.

¹⁵² EU Smart Cities Information System ホームページ情報 <http://www.smartcities-infosystem.eu/projects> より作成。

10.2. スマートグリッド

10.2.1. 開発・導入の必要性

2010年6月18日に閣議決定された「エネルギー基本計画」¹⁵³では、ITを活用しつつ、需要家側の機器と、太陽光発電等の出力が不安定な分散型電源を含む電力設備を制御することで電力の需給をバランスさせ、安定的な電力の供給を維持する、「スマートグリッド」の整備を図ることが謳われている。さらに、スマートグリッドを整備すること、さらに交通システム、市民のライフスタイルの転換などを複合的に組み合わせたスマートコミュニティの実現を目指すことが明記されている。

スマートグリッド(次世代送電網)、スマートコミュニティは、エネルギーの効率的な供給、地球温暖化問題の対策として期待されている。ITによる通信能力や演算能力を活用し、電力の流れを供給側・需要側の両方から制御し、最適化できる送電網であり、災害時や電力不足する際にも電力を安定に供給できる、太陽光発電などの再生可能エネルギーによる電力を大量に導入する際に不可欠なシステムでもある。すなわち、天候に影響されて発電量が不規則に変化する再生可能エネルギーを効率的に利用しながら、電力の安定供給を実現する。我が国においては、太陽光発電の大量導入に伴い懸念される系統運用上の余剰電力問題等の諸課題に対応する目的で、スマートグリッド技術の活用が期待されている。

また、スマートグリッドの導入は、技術革新に基づく大規模なイノベーションだけではなく、スマートメーター等を設置し、需要家のエネルギー消費パターンを制御できる様々なエネルギーマネジメントを可能にする。

マイクログリッドとは、電力会社が保有する送配電網から切り離された域内で、分散電源によって電力を供給して自家消費する電力システムである。離島やへき地など送電網を敷設することが困難で常時自家消費するタイプの「離島・オフグリッドマイクログリッド」と、常時は電力会社の送電網から電力を供給し、送電網の破損など非常時のみに送電網から遮断して自家消費する「系統内マイクログリッド」の2種類に大別できる(図79)。

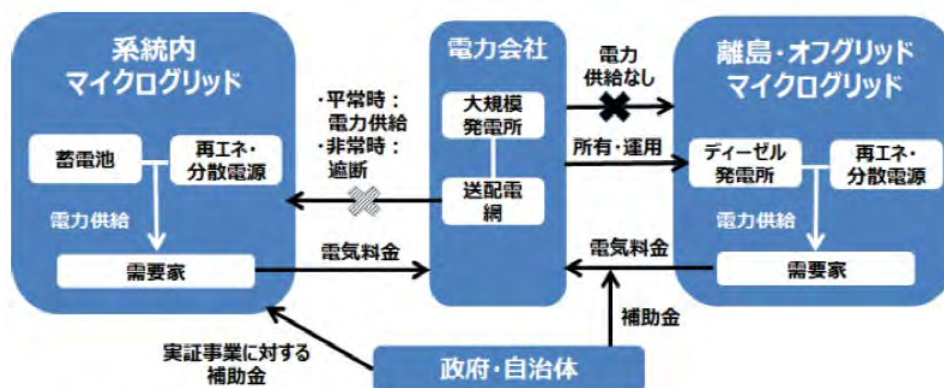


図79 マイクログリッドのスキーム
出典：JSCA ニュースレター No.33

¹⁵³ http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/100618honbun.pdf

ReportsnReports (2016) の調査報告によると、スマートグリッドの世界市場規模は、2016年の1980万ドルから2021年には6540万ドルまで年平均27%で成長すると見通している。スマートグリッド市場成長の背景として、老朽化が進んだ電力網インフラ改修の必要性の増加、電力分野の規制やエネルギー政策、配電網の集中的な管理・制御の必要性、温室効果ガス排出量を削減すべきという懸念の増加などの要因を指摘している。2016年のスマートグリッド市場でシェアが最も高い地域は北米と見込んでおり、その要因としては省エネルギー化への投資が増加すること、米国およびカナダ政府による規制や義務付けなどを指摘している。予測期間中で最も高い成長率が見込まれる地域は、アジア太平洋とし、中国、日本、インドなどでスマートグリッドの導入が急速に進むためとする。スマートグリッドのカギを握る企業として、スイスのABBとLandis+Gyr、米国のCisco Systems、General Electric (GE)、IBM、Itron、Oracle、Open Systems International、仏Schneider Electric、独Siemensの10社を挙げている。

10.2.2. 国内の技術開発動向

(1) 技術の概要

NEDO (2010) によると、スマートグリッド技術を送配電システムの監視・制御技術、需要家側のエネルギーマネジメント技術、システムの効果運用が可能となる先進技術、と様々な機器と機器、システムとシステムを接続する先進的なインターフェース技術に分類されている (図 80、表 39)。

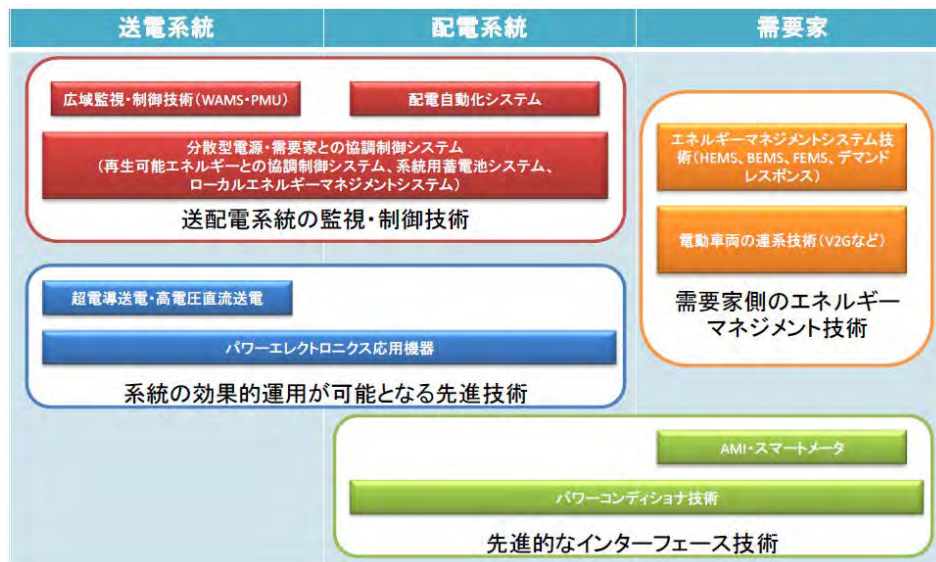


図 80 スマートグリッド技術

出典：NEDO (2010) NEDO 再生可能エネルギー技術白書 2010

表 39 スマートグリッド技術の機能別分類

機能	概要
送配電システムの監視・制御技術	現状の系統自動化、配電自動化システムに加え、今後導入が進展すると考えられる分散型電源(太陽光発電、風力発電、蓄電システム等)の管理、およびデマンドレスポンス、エネルギーマネジメントシステムに対して系統運用システムとして情報の授受を行う技術。具体的には、中央給電指令所やローカルの給電所・制御所等などでの監視・制御技術であり、広域計測システム(Wide Area Measurement System、WAMS) やその重要構成要素であるフェーザ情報計測装置(Phasor Measurement Unit、PMU)、分散型電源や需要家、蓄電池との協調制御技術、地域でのエネルギーマネジメントシステム、先進的な配電自動化システムを指す。
需要家側のエネルギーマネジメント技術	需要家側のエネルギー設備を制御し、省エネルギーや系統貢献を行う制御技術。系統情報・気象情報・電力価格情報に基づく制御の場合もある。具体的には、HEMS やBEMS、FEMS などのエネルギーマネジメントシステム、デマンドレスポンス、および電動車両による系統制御技術(V2G、G2V 等)を指す。
系統の効果的運用が可能となる先進技術	送配電システムの運用効率やフレキシビリティ、セキュリティを向上させるための先進技術。具体的には、超電導送電、高電圧直流送電、パワーエレクトロニクス応用機器(Flexible Alternating Current Transmission System、FACTS 等)を指す。
先進的なインターフェース技術	今後導入が進展する分散型電源の系統連系技術、および需要家機器と電力系統を結ぶ先進的なインターフェース技術。情報の授受、および系統との保護協調機能を有する。具体的には、パワーコンディショナ技術、スマートメーター通信システム(Advanced Metering Infrastructure、AMI) を指す。

※G2V とは、反対に電力系統から EV に連系し、風力発電等の出力変動に合わせて EV を充放電することと想定している。

出典：NEDO (2010) NEDO 再生可能エネルギー技術白書 2010

太陽光発電や風力発電などの不安定な電源の導入に伴う電力系統への影響を緩和するために、あらゆる対策技術が必要となる。例えば、需要変動に対応するために、在来型電源や再生可能エネルギー電源の発電量を予測し、それぞれの出力調整を行う。また、送配電システムの運用や柔軟性を向上させるための超電導送電やフレキシブル交流送電システム(FACTS)のようなパワーエレクトロニクス¹⁵⁴技術を始めとした技術革新の進展により、より効率的なエネルギー利用や、各エネルギー源の利用用途の拡大が可能となる。加えて、電力が安定した出力となるように周波数や交流・直流を調整、変換するパワーコンディショナ¹⁵⁵(Power Conditioning System、PCS)等の制御技術も欠かせない。需要側においては、需要サイドにおける電力需要のピーク対策に資する取組として、スマートメーター(AMI)の設置や電力需要に応じた電力消費の制御を図るデマンドレスポンスの実施、及び建物や住宅におけるエネルギー消費の効率化を図るエネルギーマネジメントシステムなどが挙げられる。

(2) 我が国が実施した主な実証研究

スマートグリッドに関連する法律はないものの、経済産業省を中心に以下の取組を実施されている。

- ・ 低炭素電力システム研究会
- ・ 次世代送配電ネットワーク研究会

¹⁵⁴ Power electronics。電力を制御する半導体を用いた電力変換機器、制御機器・システムである。

¹⁵⁵ 太陽光発電からの電力は一般的に直流であり、家庭用などの電力として使用するためには交流に変換する必要がある。

- ・ 蓄電池システム産業戦略研究会
- ・ 次世代エネルギー・システムに係る国際標準化に関する研究会
- ・ 次世代エネルギー社会システム協議会
- ・ エネルギー基本計画の改定

スマートグリッド・スマートコミュニティに係る関連技術の開発・実証においては、以下の取組みが挙げられる。

- ・ スマートメーター大規模実証実験¹⁵⁶

スマートメーター導入に期待される省エネルギー・負荷平準化効果について分析を行うことを目的として、一般家庭等に900台程度のスマートメーターを設置した上で、見える化に加え、電気料金プログラムや機器制御技術を通じた需要側の管理に係る省エネ効果を検証する等の大規模な実証事業を実施した。2009年度から2011年度までに実施され、累積で約15.9億円の予算が充てられた。

- ・ 離島マイクログリッド実証研究¹⁵⁷

10の離島¹⁵⁸を対象に、独立した系統となっている離島において、太陽光発電を大量導入した場合の実系統へ与える影響を把握するとともに、系統安定化対策に関する実証試験である。経済産業省所管の補助事業として、2009年に実施された。

- ・ 米国ニューメキシコ州における日米スマートグリッド実証
詳細はスマートコミュニティの海外事例を参照。

- ・ 次世代エネルギー社会システム実証事業
詳細はスマートコミュニティの国内実証事業を参照。

- ・ 次世代送配電系統最適制御技術実証事業¹⁵⁹

同じ経済産業省所管の補助事業である。2020年における太陽光発電等の再生可能エネルギーの大量導入目標と系統安定化を両立するために、需要家内機器の最適制御方式、配電系統の系統電圧制御方式等の開発・実証等を行うものである。2010年度から2012年度までの3年間にわたって実施された。

- ・ 国内電力会社におけるスマートメーター実証実験¹⁶⁰

電力会社においても、多くのスマートメーターに関連する各種実証事業が実施・予定されており、エネルギー・環境会議（2011年7月29日）における「今後5年以内に総需要の8割を

¹⁵⁶ 経済産業省、スマートメーター制度検討会（第11回）公開資料。

¹⁵⁷ 経済産業省、次世代送配電システム制度検討会（第7回）第1ワーキンググループ 公開資料（2010年12月27日開催）。

¹⁵⁸ 九州の黒島、竹島、中之島、諏訪之瀬島、小宝島、宝島と沖縄の宮古島、与那国島、多良間島、北大東島である。

¹⁵⁹ 経済産業省、次世代送配電システム制度検討会（第7回）第1ワーキンググループ 公開資料（2010年12月27日開催）。

¹⁶⁰ 経済産業省、電力システム改革専門委員会（第2回）公開資料（2012年3月6日開催）。

スマートメーター化する」との目標に向け、2012年2月時点で約130万個のスマートメーターが設置されている。

10.2.3. 主な国内企業

スマートグリッド関連技術の開発において、日本の重電企業は、国内外におけるスマートグリッド関連実証事業に企業コンソーシアムの形で参加し、各社の強みを生かした技術協力と共同開発事業を進めている。日立は、日本風力開発株式会社、トヨタ自動車株式会社とパナソニック電工の3社と連携し、2010年9月から2年間六ヶ所村スマートグリッド実証事業¹⁶¹を実施し、連系点潮流、地域用太陽光発電監視、スマートメーター、HUB蓄電池などの実証を進めている。そのほか、2010年度から東京電力、伊藤忠商事、東京工業大学などと共同で、次世代送電システム「日本版スマートグリッド」¹⁶²構築に向けた実証実験を実施した。

東芝は、横浜において2014年までの期間で進められている次世代エネルギー・社会システム実証や宮古島における離島マイクログリッド実証実験、米国ニューメキシコ州における日米スマートグリッド実証事業に参加しており、再生可能エネルギー、HEMS、BEMS、CEMS、次世代交通ネットワーク、ライフスタイルの更新といったテーマに関して取組を進めている。

10.2.4. 他国の主な研究開発動向

(1) アメリカ

2007年のエネルギー自立・安全法（Energy Independence and Security Act of 2007、EISA）に始まり、2009年のオバマ大統領就任及びそれ以降の「アメリカ再生・再投資法（American Recovery and Reinvestment Act、ARRA）によって、スマートグリッドに関する大規模な実証実験の展開が進められている。主なものは、エネルギー省（Department of Energy、DOE）により実施されているスマートグリッド投資補助金プログラム（Smart Grid Investment Grants、SGIG）とスマートグリッド実証事業（Smart Grid Demonstration Project、SGDP）の二つである。これは、5年間のプログラムで、DOE内に設けられた電力供給とエネルギー信頼性プログラムオフィス（Office of Electricity Delivery and Energy Reliability、略称OE）が運営主体となっている。

SGIGは送電線網の近代化、サイバーセキュリティの強化、系統相互運用のパフォーマンスを向上することに焦点が置かれており、連邦政府（ARRA）と民間から、200を超える電気関連企業や組織に総額79億ドルにのぼる巨額の投資をスマートグリッド導入プロジェクトの助成補助金として行っている。

¹⁶¹ http://www.hitachi.co.jp/products/it/portal/info/magazine/uvalere/uvalue_world/world21/index02.html ; <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2010/09/0915a.html>

¹⁶² http://www.soumu.go.jp/main_content/000049392.pdf

表 40 SGIG：投資技術分野と投資額・プロジェクト数¹⁶³

技術分野	投資予定額	プロジェクト数	備考
スマートメーター通信システム(Advanced Metering Infrastructure、AMI)：電力会社と顧客間の双方向通信を行うためのスマートメーター、双方向通信ネットワーク、データ管理システムで構成される統合システム	約40億ドル	65	2013年12月時点で、合計1,400万台のスマートメーターが設置され、予定設置数の1,550万台の90%以上を達成
カスタマーシステム：直接負荷制御機器、プログラム可能なサーモスタット、宅内ディスプレイ、ウェブポータルなど	約13億ドル	66	
先進的な送電システム：位相計測装置、またはフェーズ情報計測装置(Phasor Measurement Unit、PMU)	約6億ドル	19	2013年12月末までに追加導入されたPMUの数は1,000台を越え、当初の目標(800台)を大きく上回る。※SGIGプログラム以前に全米に設置・運用されているPMUは合計166台
先進的な配電システム：自動フィーダースイッチなど	約20億ドル	57	2013年3月時点で、故障回路の検知・隔離等の機能をもつ自動フィーダースイッチに関しては7,700台の設置が完了し、最終的に最低7,500台を設置するという目標を達成

SGDP¹⁶⁴は、SGIG 同様、DOE が先導するプロジェクトであり、その目的は現在使用されている送電線網を大幅に改善することのできる、新しくコスト効率の良いスマートグリッド技術、機器、システムを実証することである。採択されたプロジェクトには DOE から総額の 50%までの財政援助がなされる。注意すべきは SGIG が認可であるのに対して、SGDP は協調的な合意であることである。

SGDP には 2 種類のプロジェクトが存在する。1 つは地域のスマートグリッドの実現可能性の確認実証であり、スマートグリッドによるコストと利益を定量化し、国全体で着実に再実施可能か検証できる規模で新しいスマートグリッドのビジネスモデルを確認することにある。もう 1 つはバッテリーやフライホイール¹⁶⁵、圧縮空気エネルギー貯蔵のようなエネルギー貯蔵技術に関するプロジェクトであり、これらは負荷平準化、ランピング制御、周波数規制、配電設備、風力や太陽光などの再生可能エネルギーのグリッドへ組み込む際に役立つことが期待される。現在で 32 のプロジェクトが存在するが、予算総額は約 16 億ドルであり、連邦による負担額は約 6 億ドルである。また、そのうちの半数が地域的な確認実証プロジェクトであり予算額は約 8.7 億ドル、残りの半分がエネルギー貯蔵技術に関するプロジェクトであり予算額は約 6.5 億ドルである。

地域や特性に応じた様々なマイクログリッドを構築する傾向も、顕在化しつつある。東海岸のマサチューセッツ州ボストンでは、地元のマサチューセッツ工科大学(MIT)がボストン市内の各地域における電力消費の状況を詳細に分析、年間で時間ごとの電力消費パターンとしてデータ化した。これを基に、市内の候補地 22 カ所がマイクログリッドの構築に適しているという結果をまとめ、今後マイクログリッド実現に向けた検討をさらに続けるという。ほか、テキサス州やカリフォルニア州には既にマイクログリッドを活用している。

¹⁶³ http://energy.gov/sites/prod/files/2013/10/f3/SGIG_progress_report_2013.pdf より整理。

¹⁶⁴ https://www.smartgrid.gov/recovery_act/overview/smart_grid_demonstration_program.html

¹⁶⁵ 電気を回転エネルギーに変えて保存する装置

(2) ヨーロッパ

EUは、2010年のEU成長戦略「欧州2020」において、2007年に掲げた気候変動・エネルギー政策であるEU20-20-20、即ち2020年までに、温暖化ガス排出量削減（1990年比）、再生可能エネルギーの利用、エネルギー効率化に向けて各々20%の数値目標の達成には、次世代エネルギーネットワーク「スマートグリッド」の導入とEU域内と周辺地域の相互接続等のインフラの近代化が急務としている。これを具体的に進めるため、欧州委員会は2011年4月、スマートグリッドの普及に向けた計画を発表し、当時EU全体で10%程度と言われるスマートメーター設置率を2020年までに域内全世帯の80%に、2022年までに100%に到達させることを目標¹⁶⁶としている。

EU初のスマートグリッド関連のプロジェクトは、英国、イタリア、ドイツ、デンマーク等の11カ国38機関が参加したDispower（Distributed Generation with High Penetration of Renewable Energy Sources、再生可能エネルギー源の高浸透による分散型発電）プロジェクトである¹⁶⁷。これは、再生可能エネルギーを主流とする分散型発電源を開発する目的で、2002年から2004年の期間に実施された欧州初の実証事業である。欧州委員会の共同リサーチセンター（Joint Research Centre、JRC）が2014年5月に公表した報告書¹⁶⁸によれば、2002年のDispowerプロジェクトを開始してから2013年までの期間に欧州47カ国で総事業費31.5億ユーロ（約4350億円）にのぼる合計459件のスマートグリッド関連プロジェクトが実施された。そのうち211件が研究・開発段階（Research & Development、R&D）、248件が実証・配備（Demonstration & Deployment、D&D）段階にあり、全体のおよそ半数が現在も継続中である。プロジェクトの内容は、配電自動化、グリッドモニタリング・制御、エネルギー貯蔵、大規模再生可能エネルギーおよび分散型電源のグリッド統合、デマンドレスポンス、仮想発電所（Virtual Power Plant、VPP）¹⁶⁹、最先端情報通信技術（ICT）、電気自動車の利用、スマートホーム、スマートメーターなどを含む。図81に国ごとのスマートグリッドに関するプロジェクト数を示す。

¹⁶⁶ 総務省（2012）スマートグリッド関連サービスにおけるプライバシー個人情報保護に関する調査研究報告書

¹⁶⁷ 経済産業省（2015）欧米地域におけるスマートコミュニティ関連技術の海外展開モデル調査研究事業

¹⁶⁸ <http://ses.jrc.ec.europa.eu/smart-grids-observatory>

¹⁶⁹ 電力の自由化に伴って注目されている。VPPとは、常用・非常用を問わず、複数の分散電源（小規模な自家発電設備、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー発電、燃料電池や蓄電池など）を通信ネットワークでまとめて統御、及び管理するシステムで、電力の需給バランスを機動的に実施することによって、あたかも一つの発電所のように（仮想的（Virtual））機能させるソリューションである。

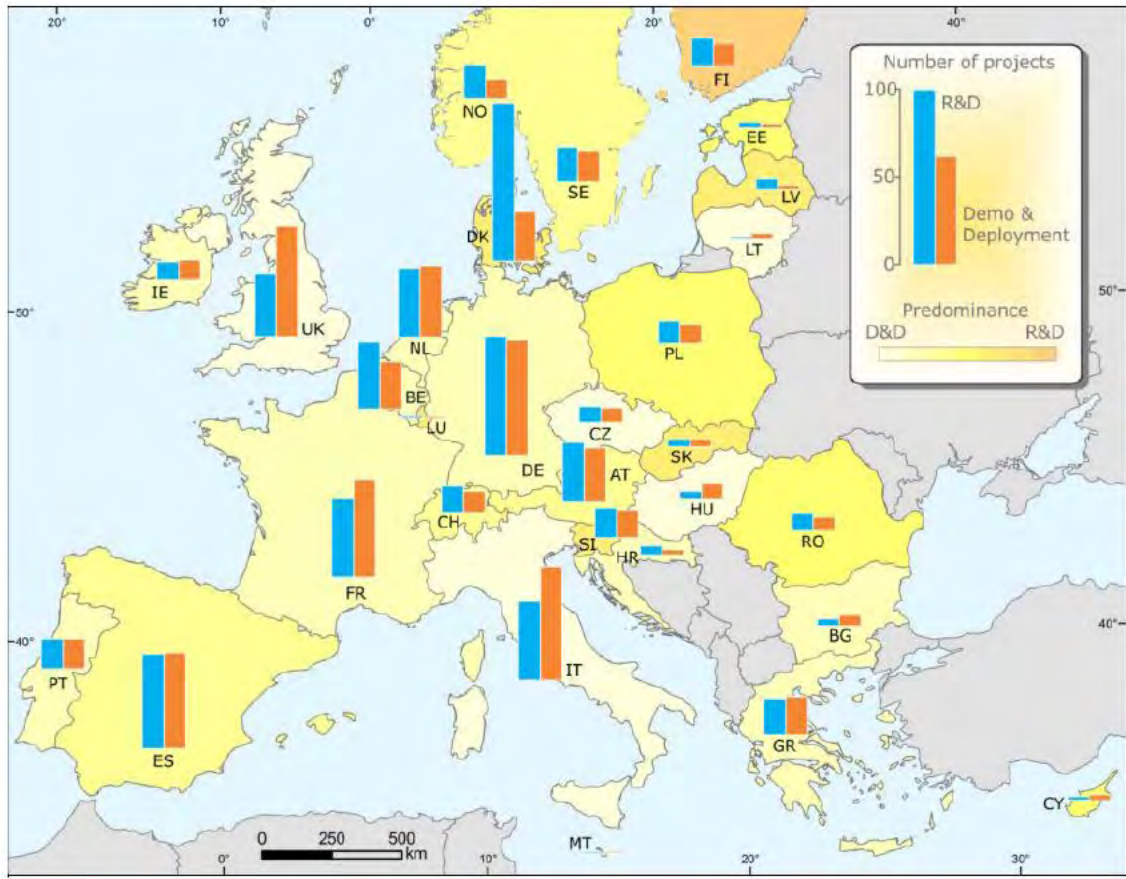


図 81 EU 内の研究開発事業数と実証事業数スマートグリッド技術
出典：EU JRC (2014) Smart grid projects outlook 2014

欧州におけるマイクログリッドの研究は、EU 加盟国内の企業、研究機関、及び大学等で分散して実施されている。第 5 次フ研究枠組み計画 (FP) での「Microgrids: Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids」プロジェクト (2003-2005)、第 6 次 FP での「More Microgrids: Advanced Architecture and Control Concepts for More Microgrids」プロジェクト (2006-2009) で、ドイツやギリシャ、イタリア、オランダなどで実験サイトによる研究¹⁷⁰が進められている。

¹⁷⁰ https://www.smart-japan.org/reference/13/Vcms3_00000142.html

10.3. デマンドレスポンス

10.3.1. 開発・導入の必要性

福島事故後、エネルギー供給の制約や集中型エネルギー・システムの脆弱性が明らかとなった。また、再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、電圧、周波数などの電気の品質の確保が課題として顕在化しつつある。こうした状況を背景に、エネルギーの供給状況に応じてスマートに消費パターンを変化させる取組デマンドレスポンス（以下 DR という）の活用可能性やその効果が注目されている。

2014年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」¹⁷¹では、エネルギー供給量に応じて需要量を抑制する DR の活用によって、発電容量の合理的な規模の維持と安定供給を実現することが謳われている。DR は本来、通常の負荷カーブから外れた季節的あるいは突発的なピーク需要を平滑化し需給バランスを適正なレベルで維持する目的で実施される。しかし、前述の「エネルギー基本計画」においても、DR の活用は「(4) 業態ごとに細分化したエネルギー消費実態に対応した更なるエネルギーの取組」の一節として提示されていることから、政策的に DR を省エネの文脈でとらえている。

10.3.2. 国内の技術開発動向


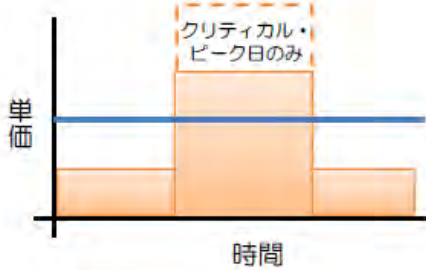
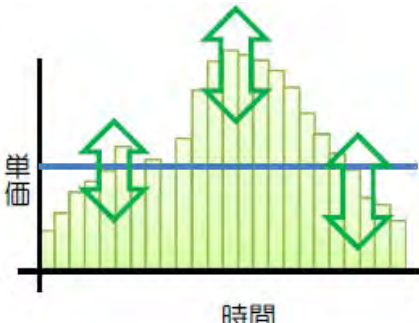
(1) DR の概要

これまでは、電力需要が多くなった場合、それに合わせて発電所を増設し、供給量を増やしていくことになっている。DR は、それとは違い節電することで電力供給量の範囲内まで需要を減らすという方法になる。DR は、需要抑制の方法によって、①電気料金設定によって需要を制御しようとする電気料金型と、②電力会社と需要家の契約に基づき、電力会社からの要請に応じて需要家が需要を制御するインセンティブ型（ネガワット取引）の大きく二つに区分できる。

電気料金型は時間帯に応じて有意な電気料金の価格差を設けることで、需要の価格弾力性（負の相関）を通じて需要家が電力の消費パターンを変化させる方法である。これに対して、インセンティブ型は需要量の抑制を節電容量という形で予め定量的に管理し、電力会社からの要請に応じて需要家が節電を実施し、その対価を報酬として需要家に支払うという方法である。表 41、表 42 に電気料金型とインセンティブ型のそれぞれの主要な DR の種類を示す。料金変動型とインセンティブ型は完全に代替する関係にはなく、料金変動型を常時に実施しつつインセンティブ型を短期的に発動させる両者の併用も可能である。

¹⁷¹ http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf

表 41 料金変動型：主な DR の料金メニュー¹⁷²

主な DR の料金メニュー	備考
<p>① Time of Use (TOU)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • 一日の時間帯ごとに異なる固定の電気料金があらかじめ設定される。 • 一旦設定された時間帯や料金は緊急時であっても固定され変動しない点が CPP と異なる。 • 緊急時であっても料金と適用時期が固定されているから、料金変動型の DR と見なさないとの見方もある。
<p>② Critical Peak Pricing (CPP)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • あらかじめ設定された非常に高い電気料金が緊急時や卸電力価格高騰時にだけ数時間単位で適用される。 • いつ発動されるかは決まっておらず数日前/前日/数時間前に需要家に知らせる。 • TOU との併用も可能。
<p>③ Real-Time Pricing (RTP)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • 卸電力価格の変動に伴って電気料金が時間単位で変動する。

¹⁷² 民生（家庭・業務）部門における省エネルギー対策強化に向けた異業種研究会報告書 平成 2014 年度（委託先日本エネルギー経済研究所）、経済産業省、電力システム改革専門委員会（第 2 回）公開資料（2012 年 3 月 6 日開催）

表 42 インセンティブ型：主な DR のタイプ¹⁷³

主な DR のタイプ	備考
① Direct load control	<ul style="list-style-type: none"> 緊急時に需要家の特定機器（エアコン、温水器等）を電力会社が停止させるなど遠隔操作で一定の制御を行う。 見返りとして需要家はインセンティブ報酬を得る。 カリフォルニア州ではエアコンを対象として 1980 年代から実施されている。
② Demand bidding/buyback programs	<ul style="list-style-type: none"> 卸電力価格高騰時に需要家が卸電力市場に自らの節電容量を入札する。
③ Emergency demand response programs	<ul style="list-style-type: none"> 緊急時に需要家を実現した節電容量に対してインセンティブ報酬を得る。
④ Capacity market programs	<ul style="list-style-type: none"> 需要家はシステム容量の代替として節電量を提供し、見返りにインセンティブ報酬を得る。
⑤ Interruptible/ curtailable	<ul style="list-style-type: none"> 緊急時に負荷削減・遮断を実施することを事前に合意し、需要家はその見返りにインセンティブ報酬を得る。 料金変動型との併用も可能だが、このオプションを料金変動型と分類する見方もある。
⑥ Ancillary service market programs	<ul style="list-style-type: none"> 需要の瞬時変動に対応するように需要家が即時性のある負荷削減を実施することでグリッドオペレーターから報酬を得る。 緊急時での発動 RTP との併用可能

我が国において、インセンティブ型（ネガワット取引）に類する需要抑制としては、従来、一般電気事業者が大口需要家との間で、需給ひっ迫時の需要抑制を条件に割引を行う需給調整契約という形で行われてきた。また、最近では、一部の新電力が、自社の需要家に対し、市場価格高騰時に需要抑制を要請し、その重要抑制量に応じて対価を支払う契約を締結している。

2014 年策定の「エネルギー基本計画」や電力システム改革を着実に進めることにより、ネガワット取引を含めた新たな事業形態を導入しやすい環境を整備していくこととされた。今後、拡大が期待されるネガワット取引は、これまでのような一般電気事業者や新電力等と大口需要家との二者間で行われる取引ではなく、小売電気事業者と需要家との間に専門の第三者（ネガワット事業者、或いはアグリゲーター）が介在することにより、家庭も含めた多様な需要家を対象として、幅広い小売電気事業者等が取引できるものに展開していく。

¹⁷³ 民生（家庭・業務）部門における省エネルギー対策強化に向けた異業種研究会報告書 平成 2014 年度（委託先日本エネルギー経済研究所）

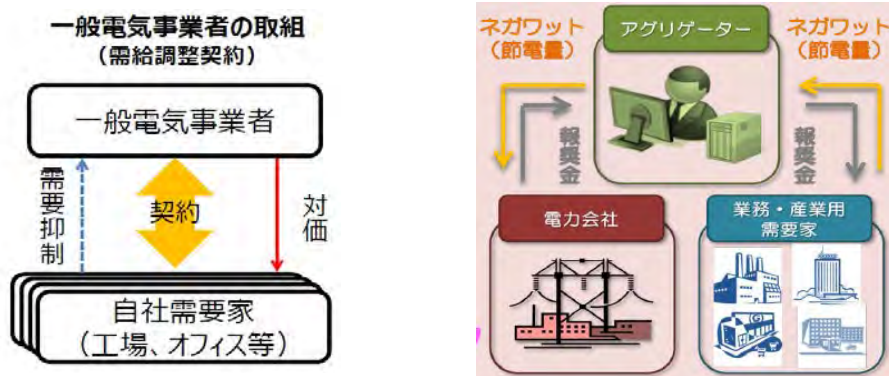


図 82 ネガワット取引に類するこれまでの取引（左）とネガワット取引の仕組み（右）¹⁷⁴

(2) 我が国が実施した主な実証研究

我が国の「エネルギー基本計画」では、スマートメーターの導入と電力システム改革による小売り事業の自由化に伴う多様な電気料金の設定が行われることで、まず前者の料金変動型の DR の実現を目指すとしている。そして、料金変動型の次の段階としてインセンティブ型による節電容量をネガワット取引という形で取引できるように定量的な管理を実施してゆくとしている。具体的には、2013 年度にネガワット取引のシステム構築等を行い、2014 年度に実証を実施し、需要削減依頼から実際の需要削減までにかかる時間や削減可能な需要量等について確認し、ネガワットの活用可能性を検証しつつ、2017 年までにネガワット取引市場を創設することを目指している。

2010 年から 2013 年にかけて国内 4 地域で実施されたスマートコミュニティ実証実験から、北九州とけいはんな地区で我が国初の料金変動型の DR の実証実験を実施された。表 43 に地区別のピークカットの削減率を示したものである。大まかに見ると、2 割のピークカット効果が得られている。CPP の価格を高くした場合でも、その効果は大きく変化しないと言えよう。

¹⁷⁴ 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力基本政策小委員会（第 5 回）公開資料（2016 年 3 月 30 日開催）

表 43 北九州とけいはんな地区での料金変動型 DR によるピークカット率¹⁷⁵

北九州市		2012年度 夏(6月～9月)		2012年度 冬(12月～2月)		2013年度 夏(6月～9月)	
電気料金(※1)	ピークカット効果	統計的有意性(※3)	ピークカット効果	統計的有意性(※3)	ピークカット効果	統計的有意性(※3)	
TOU	-(※4)	-(※4)	-(※4)	-(※4)	-(※4)	-(※4)	-(※4)
CPP=50円	-18.1%	5%水準	-19.3%	1%水準	-20.2%	1%水準	
CPP=75円	-18.7%	5%水準	-19.8%	1%水準	-19.2%	1%水準	
CPP=100円	-21.7%	1%水準	-18.1%	1%水準	-18.8%	1%水準	
CPP=150円	-22.2%	1%水準	-21.1%	1%水準	-19.2%	1%水準	

けいはんな		2012年度 夏(7月～9月)		2012年度 冬(12月～2月)		2013年度 夏(7月～9月)	
電気料金(※2)	ピークカット効果	統計的有意性(※3)	ピークカット効果	統計的有意性(※3)	ピークカット効果	統計的有意性(※3)	
TOU(20円上乘せ)	-5.9%	1%水準	-12.2%	1%水準	-15.7%	1%水準	
CPP(40円上乘せ)	-15.0%	1%水準	-20.1%	1%水準	-21.1%	1%水準	
CPP(60円上乘せ)	-17.2%	1%水準	-18.3%	1%水準	-20.7%	1%水準	
CPP(80円上乘せ)	-18.4%	1%水準	-20.2%	1%水準	-21.2%	1%水準	

他方、ネガワットの実証研究は、3社の電力会社（東京電力、関西電力、中部電力）と約20組のアグリゲーターの参加のもの、多様な属性（業種、保有設備等）の需要家において2015年度に実施された。その結果、需要削減に関して成功率が最も高いアグリゲーターの成功率は85%以上であった。設備別で見ると、制御機器が自家発である場合に相対的に高い成功率が得られた（図 83）。

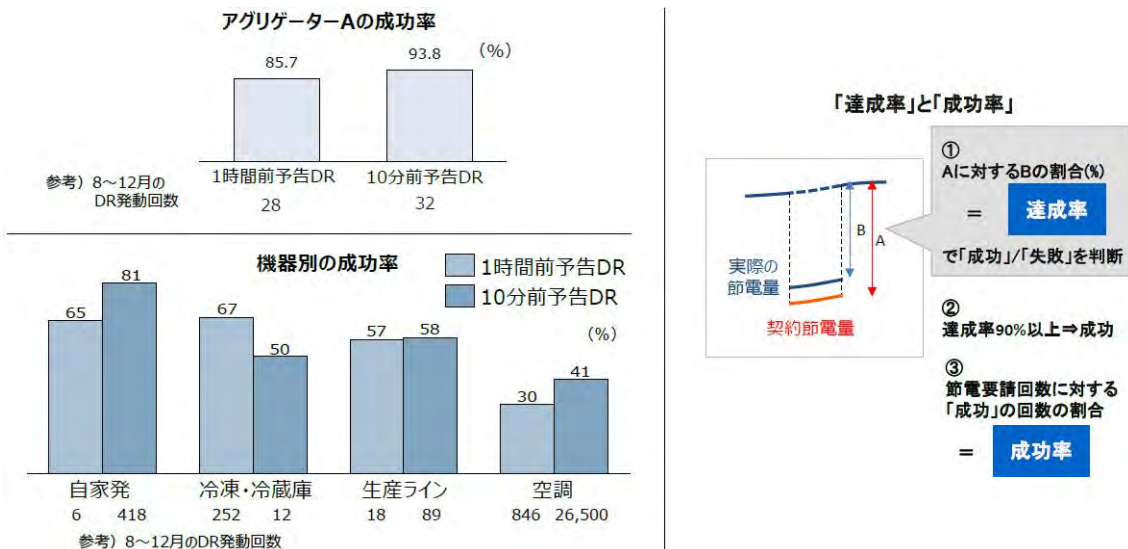


図 83 ネガワット取引実証結果¹⁷⁶

我が国が海外で実施している DR 実証事業として、NEDO が米国ニューメキシコ州でのスマ

¹⁷⁵ 経済産業省 次世代エネルギー・社会システム協議会（第18回）公開資料（2016年6月7日開催）

¹⁷⁶ 経済産業省、次世代エネルギー・社会システム協議会（第18回）公開資料（2016年6月7日開催）

ートグリッド共同プロジェクトが挙げられる¹⁷⁷（プロジェクトの概要については、スマートコミュニティの海外事例を参照）。同プロジェクトは、約 900 軒の住宅を対象に、2013 年から 2 年間にわたり、時間帯別に異なる電気料金を設定し、消費者の消費行動を変えることで、電力の需要パターンの変化を促す DR 実証を行い、各家庭の夕刻の電力消費を最大で約 10%抑制できることを実証した。

10.3.3. 主な国内企業

東京電力は、横浜スマートシティプロジェクトにおいて、家庭用 DR メニューの検討・導入を行った。また、早稲田大学 EMS 新宿実証センターにおいて、DR の活用領域を従前の夏季ピークカットだけでなく、アンシラリーや経済代替活用まで拡大することを念頭に、経済産業省および国内外の DR 事業者とインセンティブ型 DR 実証も実施されている¹⁷⁸。

ネガワット取引としての DR を手掛けている企業として米国 EnerNOC（エナノック）¹⁷⁹社を取り上げられる。EnerNOC 社は、DR のアグリゲーター（DR アグリゲーター）の最大手企業であり、2013 年に丸紅と合併支社を設立し、経産省のネガワット取引実証実験に参加するなど、DR の市場に積極的に参画している。

2017 年のネガワット取引市場の創設に向けて、デマンドレスポンス推進協議会（DRC）¹⁸⁰は 2015 年 3 月に、経済産業省のネガワット取引実証事業に参加しているアグリゲーターが集まり、設立された。本協議会は、日本において今後導入と拡大が期待されている DR の立上げを育成し、その発展を通じて電力システムの信頼性向上、効率化、コスト低減、CO2 削減に貢献し、DR 産業発展に努めることを目的としている。2016 年 3 月現在、アズビル、エナノック、エナジープールジャパン、ダイキン、京セラ、双日、東芝、日立、丸紅、三菱電機などの 17 社がメンバーとなっている。

10.3.4. 他国の主な研究開発動向

(1) アメリカ

米連邦エネルギー規制委員会（Federal Energy Regulatory Commission、FERC）の報告書によれば¹⁸¹、2013 年の米国における DR によるポテンシャルピーク削減量は全体で約 2,710 万 kW となっている。米国全体として部門別のポテンシャルを見ると、全体の 55%が産業部門となっている。次いで家庭部門が 26%、業務部門が 19%となっている。

ARRA によって実施されている実証の中に DR にかかる実証も含まれており、多数の実証事業が実施された。2015 年 6 月には、米国エネルギー省（Department of Energy、DOE）がこれらの実証の成果を取りまとめた Interim Report を発表している¹⁸²。同報告では、電気料金の変化

¹⁷⁷ http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100376.html

¹⁷⁸ <http://www.tepco.co.jp/corporateinfo/company/rd/superconduct/DR.html>

¹⁷⁹ 2001 年に設立され、2007 年米 NASDAQ に上場、従業員数約 1,000 名。世界 11 カ国で DR サービスを提供している。管理ネガワット規模は約 7,000MW、世界最大の DR 事業者である。

¹⁸⁰ <http://www.dr-council.jp/about.html>

¹⁸¹ FERC (2015) Assessment of demand response advanced metering. Staff report 2015.

¹⁸² DOE (2015) Interim report on customer acceptance, retention and response to time based rates from the consumer behavior studies.

とピークカットに関する消費者行動に着目して実証結果を整理している。

電力会社自身が顧客向けに DR サービスを実施するケースは、発電部門と小売部門を持つ垂直統合型の電力会社が多いアメリカで盛んである。例えば、カリフォルニア州 PG&E、オクラホマ州 OG&E は、いずれも顧客向けに DR サービスを提供している。表 44 に米国における主要 DR プロジェクトの概要を示す。

表 44 米国における主要 DR プロジェクト¹⁸³

実施主体	特徴	成果・実績
米カリフォルニア州 PG&E (Pacific Gas & Electric)	需給逼迫時に需要家のエアコンを直接制御する DR サービス「SmartAC」を展開。温度設定を自動で変更してネガワットを確実に発生させ、50ドルの報酬を付与。BMWとの連携で電気自動車顧客に対しても DR サービスを開始	2007年からの累計で30万軒、2014年現在でも15万軒が DR プログラムに参加し、ピークカットに貢献。自動車顧客向け DR サービスは、2015年から開始し、100台からスタート
米オクラホマ州 OG&E (Oklahoma Gas & Electric)	家庭など需要家向け DR サービス「Smart Hours」を展開。料金プラン、スマートサーモスタット、Webポータルを活用して、顧客にピーク時の料金を通知して、節電要請を行う	2012年末で4万2000世帯が DR サービスに参加。目標は、16万件(全需要家の20%)。最大30%、最小11%のピークカット効果が認められ、火力発電所の新規建設を凍結
米 PHI (Pepco Holdings Inc)	Comverge のシステムを導入し、一般家庭中心に需要家向けに DR サービスを提供。顧客にはスマートサーモスタットや制御機器などの設備を無償提供して、参加時に80ドル、需要削減に協力したら追加で80ドル支払う	一般家庭中心に約35万件の需要家が DR プログラムに参加し、40万5000kW のネガワットを管理。
米 EnerNoc	大口商業・産業施設向けに DR サービスを展開し、主に卸電力市場の容量市場で売り上げ・利益を伸ばした。需要家向けにはエネルギーサービスを充実させ、省エネメリットも訴求	契約大口商業・産業施設は約9000社(2014年7月)、NOC (Network Operations Center) からコントロールできる DR 資源は9000MW。売り上げは、2013年3億8000万ドル、2014年4億6500万ドル。売り上げの70%が卸電力市場

(2) ヨーロッパ

現在欧州における DR 事業は産業需要家と業務需要家向けを中心に実施されている。欧州における DR 事業は米国と比べ、進展が遅れ、規模も小さい。欧州における DR の普及を推進する業界団体 SEDC (Smart Energy Demand Coalition) によれば、DR が商業的に整備された国が2015年には英国、スイス、ベルギー、アイルランド、フィンランドとフランスの合計6カ国と報告されている。DR の環境が整備されている国は未だ多くないことが分かる。EU 各国の DR 利用状況は図 84 に示す。主要国のスマートグリッド・DR への取組みの概要は表 45 にまとめる。

¹⁸³ JSCA newsletter 32 号

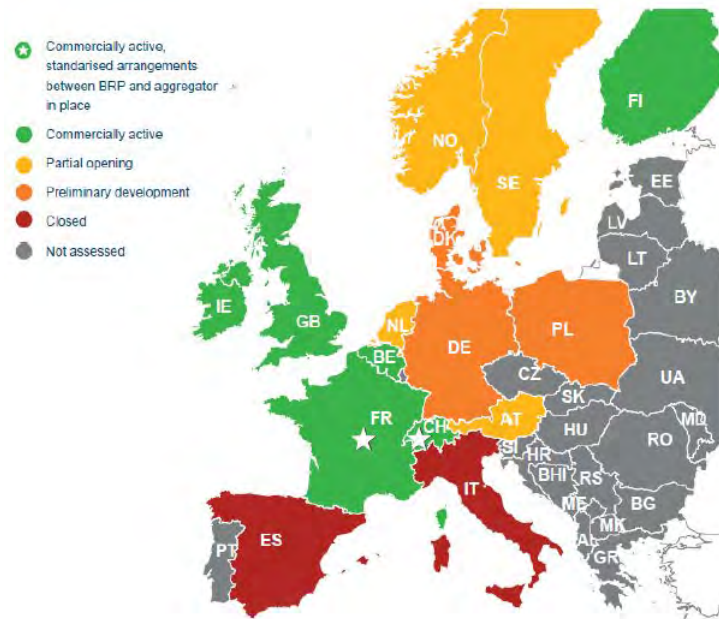


図 84 EU における DR 利用状況

出典：SEDC（2015）Mapping Demand Response in Europe Today -2015

表 45 EU 主要国のスマートグリッド・DR への取組み¹⁸⁴

国	DRへの取組み
英国	DRの実施を目指して、最先端のオープンADR（自動DR）の導入を検討するなど積極的な姿勢を見せている。そして、スマートメーターを2019年までに2700万世帯に導入することを義務化した。現在英国では以下二つのプログラムが実施されている。 <ul style="list-style-type: none"> •STOR プログラム(Short Term Operating Reserves Programme) •DPCR5(Distribution Price Control Review 5)
フランス	スマートメーターの設置を義務化し、2018年までに3500万件の設置を目標に掲げている。また、冬季の電力のピークカット・ピークシフトのためにDRを実施している。
イタリア	イタリアのEnel社は過去10年間渡って、従来式の電気メーターを電子式メーターに切り替える事業を実施している。2011年まで、95%の従来式の電気メーターを電子式メーターに切り替えた。Enel社は更に、見える化装置SmartInfoの実証プロジェクトを実施している(実施期間2010年～2014年)。イタリアの送電系統運用事業者(TSO)は年間390万kW規模の負荷抑制プログラムを実施しているが、産業需要家のみを対象としている。
ドイツ	スマートメーター導入義務付けなどの法制化はされていないが、環境と経済面からエネルギーの長期的な安定供給を実現することは、国の最優先課題ととらえている。そのため、政府はエネルギー供給システムを管理・制御し、最適化を図る「E-Energy」構想の実現をすすめている。「E-Energy」の実証プロジェクトの6つには、ICT技術を活用したDRが含まれている。

¹⁸⁴ 経済産業省（2013）スマートコミュニティ推進に向けたデマンドレスポンスに関する海外動向調査（委託先日本エネルギー経済研究所）

10.4. BEMS_HEMS

10.4.1. 開発・導入の必要性

2015年7月16日、「長期エネルギー需給見通し」が決定、本見通しでは、高効率技術の導入及び運用面でのエネルギー効率改善により2030年までに自然体と比較して5030万kl分の徹底した省エネルギーを行うことを織り込む。この結果、最終エネルギー消費のGDP原単位は現状から2030年までに35%改善と見込まれており、この改善は、石油危機を挟む1970～90年に達成した水準と同様の大幅改善に相当する。本見通しでの省エネルギーを部門別に見ると、2030年における民生部門（家庭及び業務）が全体の49%と最大の割合を占める。

家庭・業務部門における省エネルギーの推進は日本のCO₂削減目標達成に向けても重要である。日本の2030年までのCO₂削減に関する約束草案では、2013年度比26%削減としている。CO₂排出目標達成の内訳として、業務部門の貢献が36%と最大で、これに家庭部門の26%、運輸部門の20%そして産業・転換部門がそれぞれ9%となっている。これらを踏まえて、民生部門の省エネルギー対策の強化が求められている。

家庭・業務部門の省エネルギー対策として、HEMS（Home Energy Management System）ならびにBEMS（Building Energy Management System）への期待は高い。「長期エネルギー需給見通し」で2030年に達成すべきとして想定される家庭部門の省エネルギー量は1,160.7万klに上り、このうちHEMS・スマートメーターを利用した家庭部門における徹底的なエネルギー管理の実施による省エネ量は、100%の世帯での導入・普及を想定し、178.3万kl、家庭部門の省エネルギー量の15%を占める。なお、同見通しにおけるトップランナー制度による機器の省エネルギー性能向上の省エネルギー量が2030年時点で133.5万klとHEMSの省エネ量を下回る想定になっている。これは、機器によっては、エネルギー効率改善が既に経済的に達成可能な限界に近付いていることに加え、機器単体の効率改善が進む一方で保有台数が増加していることから、運用面での効率改善が必要であることを考慮しHEMS（ならびにスマートメーター）を利用したエネルギー管理を推進する必要性があることを示唆する。

これ以外にもHEMS導入の導入に向けた背景として、省エネルギーの推進ならびに気候変動対策として政府がZEH（Zero Energy House）の新築100%普及目標を設定している。目標達成に向け、ハウスメーカー等が住宅用太陽光発電システム、燃料電池、蓄電池ならびにHEMSをセットで販売しており、2030年に向け、世帯ではHEMSを備えたスマートハウスの普及が期待されていることも背景にある。

導入に向け検討が進められるデマンドレスポンスの対応として、ダイナミック・プライシングなど柔軟な電力料金に対応するためにはHEMSによる機器の自動制御（Auto Demand Response: ADR）が有効であり、ADR対応機器と機器を制御するためにHEMSの導入によりDRを実施することが必要となる。

同じく「長期エネルギー需給見通し」における2030年に想定される業務部門の省エネ量は、1,226.5万klと推計される一方、BEMSの活用、省エネ診断等による業務部門における徹底的なエネルギー管理の実施による省エネ量は同じく2030年時点で47%の導入・普及を想定した上で235.3万klと推計され、全体の19%に上る。対策別の省エネ量としては、業務部門では新

建築物の省エネ基準適合が2030年で332.3万klと最大であり、これにトップランナー制度による機器の効率改善(278.4万kl)、高効率照明の導入(228.8万kl)、そしてBEMSの活用(省エネ診断の実施を含む)が続いており、運用面でのエネルギー効率改善に対する重要性を示唆するものである。

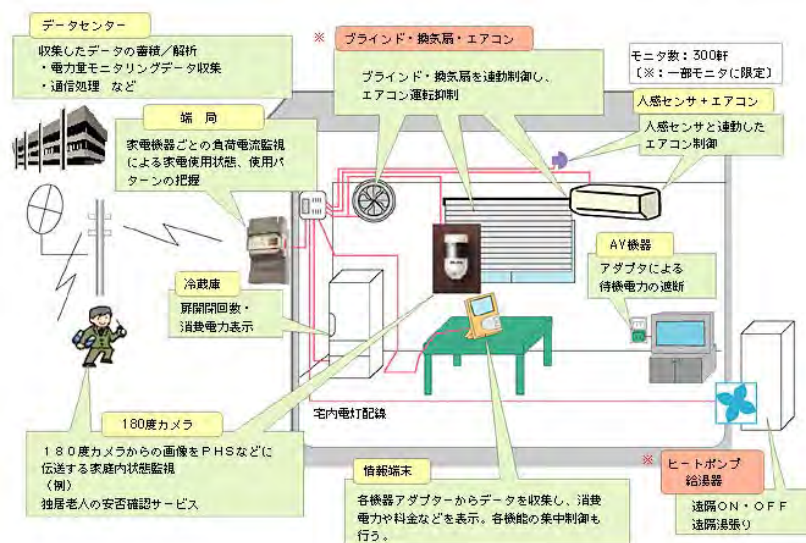
10.4.2. 国内の技術開発動向

(1) 技術の概要：HEMS

HEMSは、IT技術を活用し、家電機器や給湯機器をネットワークでつなぎ自動制御する技術である。HEMSには、家庭のエネルギー消費を機器別・時間別に表示する「見える化」機能に留まるものから、家庭の電力・ガス料金制約やCO₂排出制約、または室内温度設定に応じて機器側が最適運転できるように自動制御する機能を備えたものまで多様な種類が存在する。

NEDOが行った実証事業では、HEMSの導入により季節ごとの差はあるものの、6~12%程度の省エネルギー効果があると指摘している¹⁸⁵。

図 85：ホームエネルギーマネジメントシステム (HEMS) の概要



(出典) 資源エネルギー庁 (2006)『エネルギー白書』

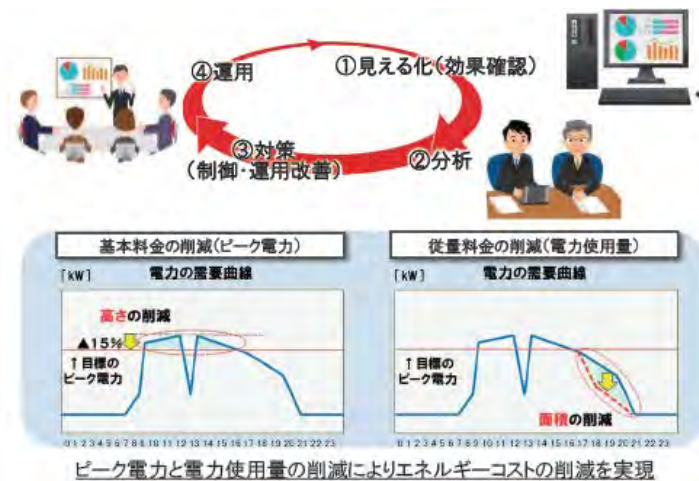
¹⁸⁵ 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2006)『平成18年度 一般家庭におけるHEMS導入実証試験による省エネルギー効果の評価解析』

(2) 技術の概要：BEMS

BEMSは事務所・ビル、店舗など建物のエネルギー使用状況の見える化に加え空調や照明などの設備機器の制御を行い、最適なエネルギー運用を支援するシステムのことである。技術の導入のみならず、見える化を行うこと、ならびに省エネルギーサービス提供者により電力使用量を計測すると共に計測結果のデータ化、表示そして省エネルギーサービス提供者がこれら进行分析し、制御や運用改善などの対策を検討、機器・設備の運用を制御することで、省エネルギーを推進するシステムである。特に運用面での改善により、BEMSを活用することで、ピーク時間帯から機器の稼働時間をシフトさせることにより電力料金の節減にも寄与する。

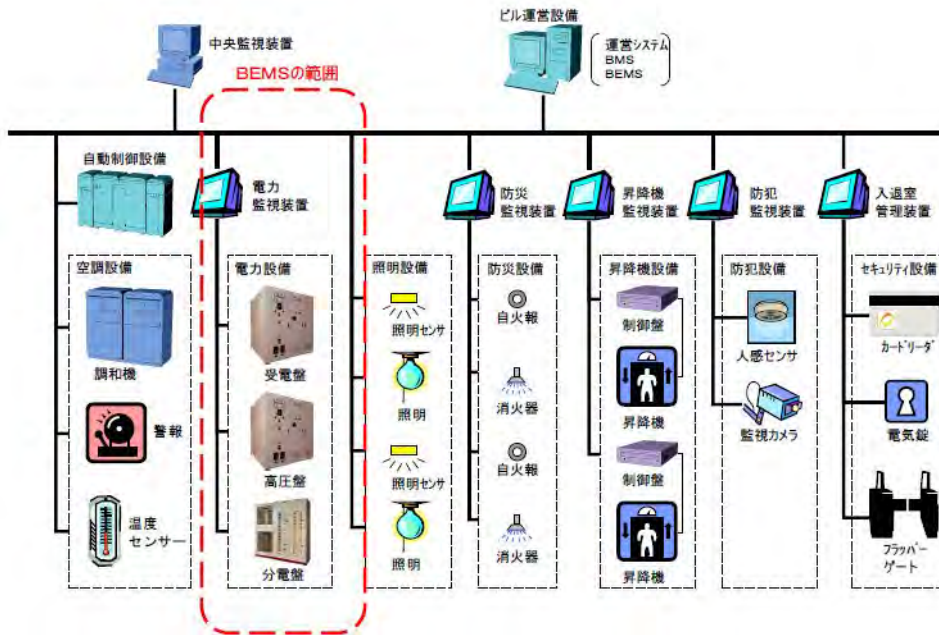
なお、大規模ビルでは中央監視装置によってビル設備の制御を行うのが一般的であり、またビルでの消費エネルギーが大きいため、エネルギー使用状況を可視化する必要性が高くあった。このため、中央監視装置/ビルオートメーションシステム (BAS) に BEMS が付随して導入されている。

図 86：ビルディングエネルギーマネジメントシステム (BEMS) の概要



(出所) 一般社団法人 電子情報技術産業協会 (2015)「BEMS による省エネ効果 - IT を活用したビルのエネルギーマネジメント」

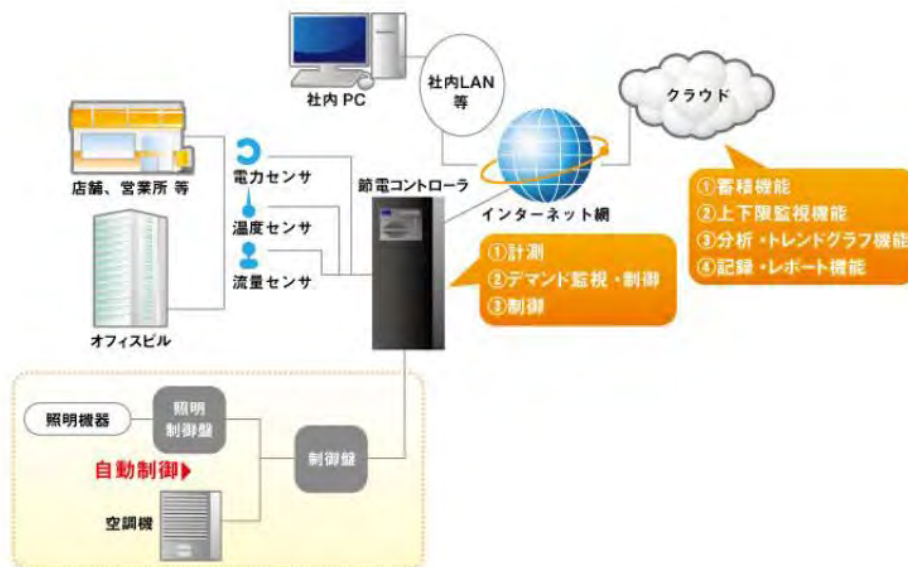
図 87：大規模ビル向け BEMS の例



(出所) 一般社団法人 電子情報技術産業協会 (2015) 「IT 活用による省エネ効果に関する調査研究報告書 ～ビル、店舗への BEMS 導入による省エネ効果～」

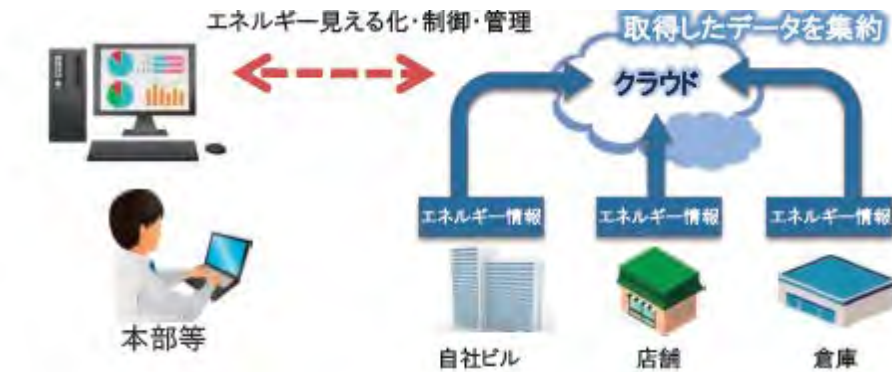
対照的に、中小規模ビルにおいて、従来中央監視装置が設定されている例はほとんどなく、エネルギー消費量の可視化も進められてこなかった。他方、近年は床面積あたりエネルギー密度の高い中小規模ビルまたは店舗が増えていることから、BEMS を導入しエネルギー消費の見える化、ならびに制御を行うケースが増えつつある。

図 88：中小規模ビル向け BEMS の例



近年ではクラウドを活用した自社ビル、店舗、倉庫等の複数拠点の複数拠点一括管理システムも浸透してきており、初期投資の低減が可能になっている。

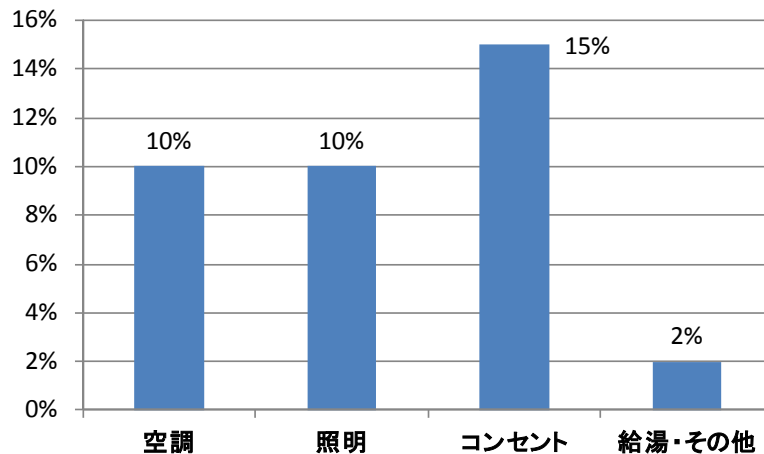
図 89：クラウドを活用したビルディングエネルギーマネジメントシステム（BEMS）のイメージ



(出所) 一般社団法人 電子情報技術産業協会 (2015)「BEMS による省エネ効果 - IT を活用したビルのエネルギーマネジメント」

BEMS の活用による効果は、(一社) 電子情報技術産業協会の試算によると、建物全体で約 10%の省エネに貢献するとされている。

図 90： BEMS の省エネ効果



(出所) 一般社団法人 電子情報技術産業協会 グリーン IT 委員会 BEMS 導入促進 WG による試算 (2015)

(3) 技術開発動向

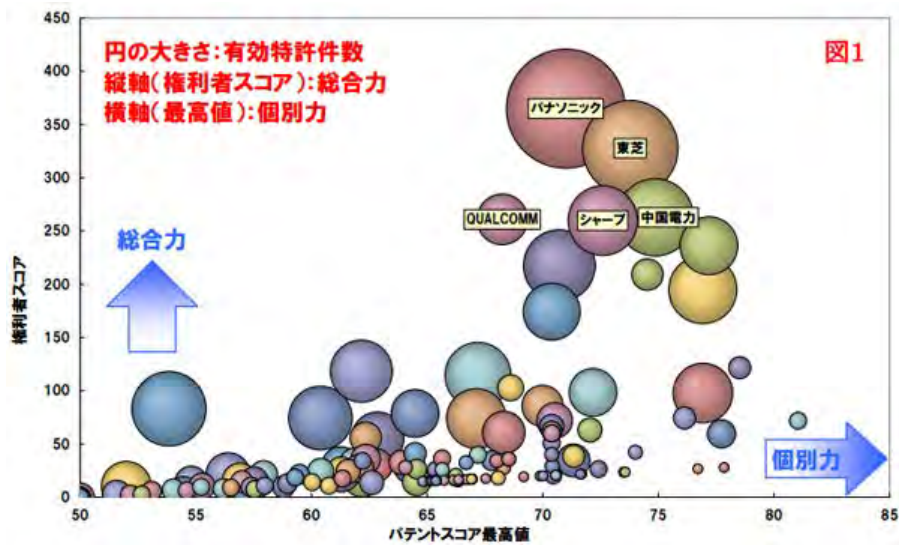
① HEMS

ここでは HEMS 関連技術の開発動向を把握するために、特許分析等を行うパテント・リザルト社が行った HEMS 関連技術の特許出願に関する調査結果を参照する。本調査では、日本国内での HEMS 関連技術開発にかかわる特許申請件数ならびに個別特許が有する得点の両面から

総合力を評価している。これによると、総合評価としてはパナソニックが1位、2位が東芝、3位が中国電力、4位には米クアレコム (QUALCOMM)、5位はシャープであった。

同調査が指摘するところでは、1位のパナソニックでの注目度の高い特許として、「時間帯別電気料金情報に基づいて複数の電気機器の予約運転を行う制御システム等」や「配電システム」、「非接触電力伝送回路」が挙げられている。2位の東芝は、「非接触型の充電等」や「予備力計算装置等」の特許を有している。3位の中国電力の特許としては、「電力系統における電力調整方法・装置」ならびに「非接触給電システム、給電装置等」が挙げられる。

図 91 : HEMS 関連技術の特許出願状況



(出典) 環境ビジネスオンライン (2013) 「国内 HEMS 関連特許ランキング トップ3 はパナソニック、東芝、中国電力」¹⁸⁶

¹⁸⁶ https://www.kankyo-business.jp/news/004803.php?utm_source=mail&utm_medium=mail130515_d&utm_campaign=mail

表 46 : HEMS 関連技術の特許総合力トップ 5

順位	企業名	総合力 (権利者スコア)	有効特許件数	個別力 (最高スコア)
1	パナソニック	365.0	142	71.0
2	東芝	327.7	92	73.8
3	中国電力	262.8	60	74.9
4	QUALCOMM	260.9	26	68.3
5	シャープ	259.9	49	72.6

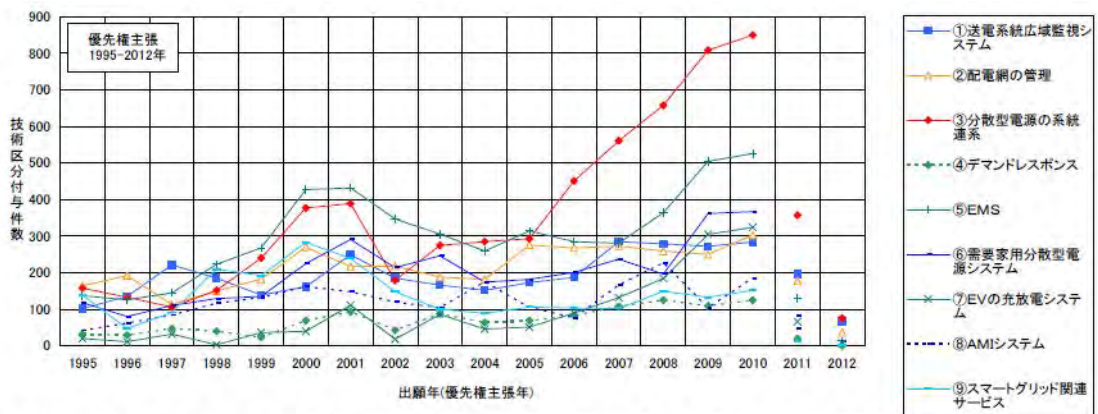
(出典) 環境ビジネスオンライン (2013) 「国内 HEMS 関連特許ランキング トップ 3 はパナソニック、東芝、中国電力」 https://www.kankyo-business.jp/news/004803.php?utm_source=mail&utm_medium=mail130515_d&utm_campaign=mail
<http://financegreenwatch.org/jp/?p=30478>

② EMS 全般

ここでは特許庁(2013)¹⁸⁷のデータを参照し、日本のエネルギー管理システム(EMS)技術の特許出願状況をスマートグリッド実現するための管理・監視技術と比較し、動向を把握する。本調査では、1995年から2012年に提出された日本特許文献ならびに外国特許文献、及び非特許文献を参照し、スマートグリッドを実現するための管理・監視技術として①送電系統広域監視システム、②配電網の管理、③分散型電源の系統連系、④デマンドレスポンス、⑤EMS、⑥需要家用分散型電源システム、⑦EVの充放電システム、⑧AMIシステムならびに⑨スマートグリッド関連サービスを技術分野として特定している。

以下の図が示す通り、全世界におけるスマートグリッド関連技術の特許出願件数としては、全体の21.9%が分散型電源の系統連系に関する出願で、これにEM(17.5%)、配電網の管理(12.8%)、送電系統広域監視システム(11.8%)、需要家用分散型電源システム(11.6%)が続く。EMSの特許申請件数は、2007年以降急増している。

図 92： 全世界におけるスマートグリッド関連技術の特許出願状況

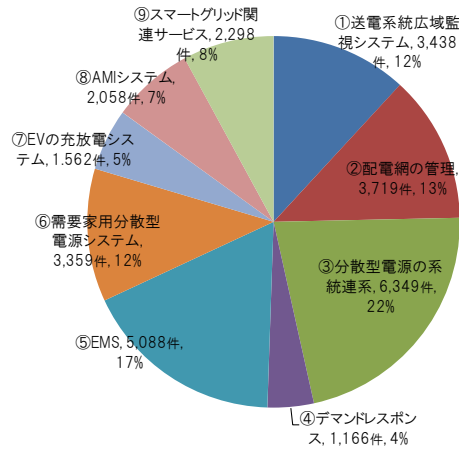


注:2009~2010年はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全データを反映していない可能性がある。
2011~2012年は一部の公開された出願のみを示す。

特許庁(2013)『平成24年度 特許出願技術動向調査 -スマートグリッドを実現するための管理・監視技術-』

¹⁸⁷ 特許庁(2013)『平成24年度 特許出願技術動向調査 -スマートグリッドを実現するための管理・監視技術-』

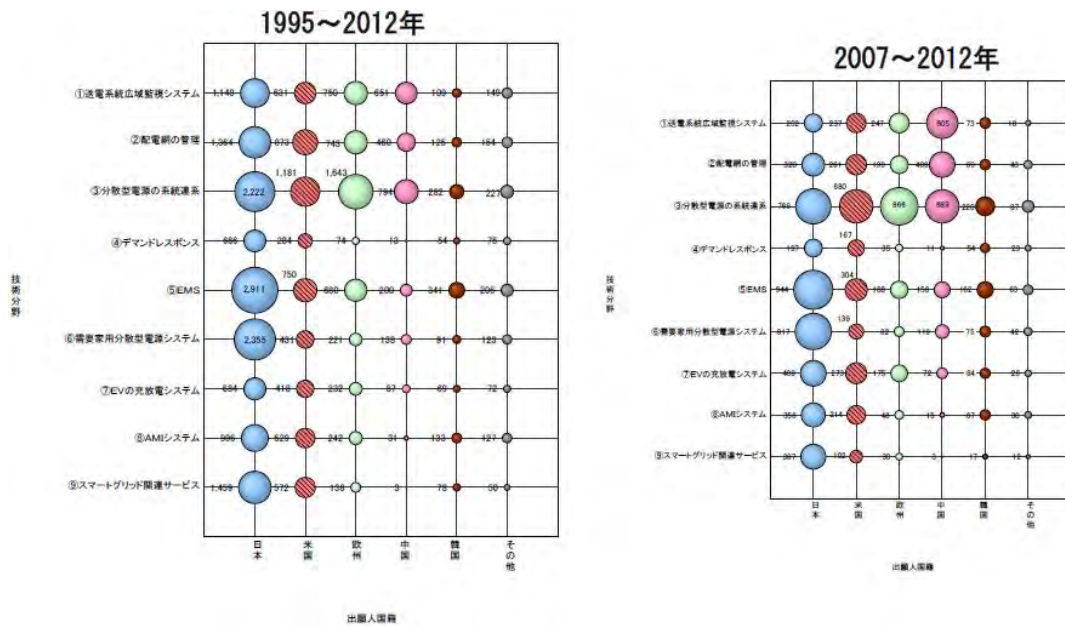
図 93： 全世界におけるスマートグリッド関連技術別の特許出願割合



(出典) 特許庁 (2013) 『平成 24 年度 特許出願技術動向調査 - スマートグリッドを実現するための管理・監視技術 - 』

なお、1995～2012 年の 18 年間では、いずれの技術分野においても日本国籍出願人の出願件数が最多である。2007 年以降、送電系統広域監視システムで米欧中の国籍出願人の出願件数が、配電網の管理で中国籍出願人の出願件数が日本のそれを上回っている。また、分散型電源の系統連系で欧州国籍出願人の出願件数が日本のそれを上回っている。

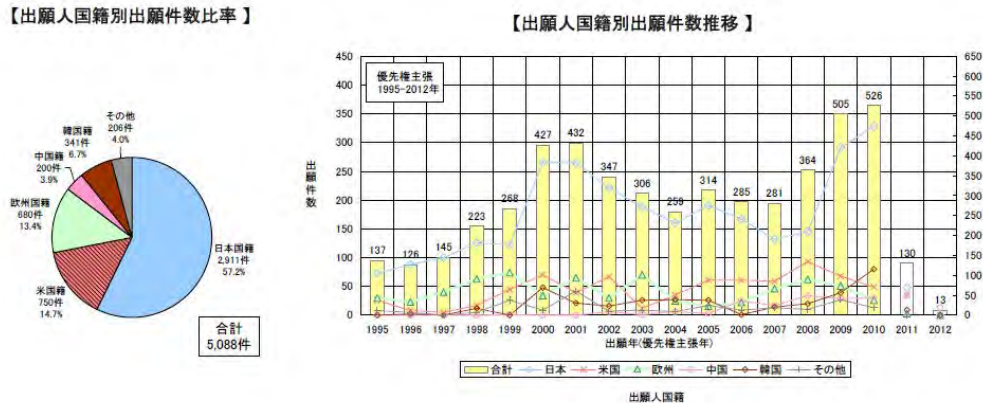
図 94： 全世界におけるスマートグリッド関連技術の特許出願状況



特許庁 (2013) 『平成 24 年度 特許出願技術動向調査 - スマートグリッドを実現するための管理・監視技術 - 』

EMS に関して、全世界への特許出願は日本が最多で全体の 57.2%を占める。これに、米国 (14.7%)、欧州の 13.4%が続く。

図 95：全世界における EMS 技術の特許出願状況



特許庁 (2013) 『平成 24 年度 特許出願技術動向調査 - スマートグリッドを実現するための管理・監視技術 - 』

③ 実証事業

経済産業省では、豊田市、北九州市、けいはんな、横浜市のスマートコミュニティ 4 地域で大規模なエネルギーマネジメントシステム (HEMS, BEMS, MEMS, FEMS, CEMS) の研究開発ならびに実証実験を実施した。これらの取組みと連携しつつ、総務省では通信ネットワーク技術に関する実証実験を実施した。

また、環境省では直流給電技術等を用いた自立・分散型低炭素エネルギー・システムの技術開発・実証や、HEMS データを活用した家庭における CO2 削減実証を行っている。

電力会社や電機メーカー、大学、研究機関の参画を得て、EMS と通信機器の相互接続を実現するための検討を行っている。

(4) 導入見込みの事例、市場規模

経済産業省が 2015 年に策定した長期エネルギー需給見通しでは、2030 年に HEMS の普及率をほぼ 100%、BEMS の普及率は中小業務ビルでの導入に対する経済的障壁を考慮し、47%と想定している。

表 47：HEMS・BEMS の導入実績及び普及見通し

	導入実績 (FY2012)	導入・普及見通し (FY2030)
HEMS	0.2%	ほぼ 100%
BEMS	6%	47%

経済産業省 (2015) 『長期エネルギー需給見通し』

BEMS の市場規模は、日経 BP クリーンテック研究所「世界スマートシティ総覧 2012」によると、世界市場規模は、2,000 億円以上に達しているとの推計もある。

10.4.3. 主な国内企業

(1) HEMS

HEMS の普及に向け、国内では異業種間連携が進んでおり、電力会社、電気メーカー、大学、研究機関がコンソーシアムを組み、エコーネットライトと呼ばれる複数機器を同時に制御するための共通規格の構築に取り組んできた経緯がある。また、導入補助事業等の実施により、導入が進んでいることもあり、国際的に技術の優位性を持ちつつある。

(2) BEMS

国内ではアズビル、ジョンソン・コントロールズが 2 大事業者である。アズビルでは様々な BEMS に関する技術開発も行っている。計測・制御技術ならびに情報処理技術に関して、4 分野を戦略的技術領域として定め、技術開発が実施されている。

① 自在計測制御技術

広域な生産・居住環境で時間・場所を特定せずに計測・制御する技術で、これまでの設置場所や時間、環境の状況により計測が困難で制御できなかった対象を自在に計測・制御する技術。

② わかる化プロセス情報技術

複雑なプロセスの状態・課題をわかる化し、高度にシステムを制御、進化させる情報技術。「見える化」から一歩進んで「わかる化」へ深化させることで、複雑なプロセスの状況・課題に対し飛躍的かつ高度にシステムを制御・進化させる情報処理技術。

具体的には、人工知能技術で工場等における機器の操作データに関して正常時の振る舞いを学習させ、正常時とは異なる動きを早期に発見し、管理者へ通知するシステムを開発している。

③ 環境調査計測制御技術

人の営み（生産・居住環境におけるエネルギー消費）に環境負荷低減を調和させる制御技術で、環境変化を学習して最適なエネルギー供給を行い、環境負荷低減を目指す計測・制御技術である。

以下は、ビルを利用する人々に対して最適な情報や利便性を提供するクラウドベースのオンラインサービスである。クラウド上のデータ間のつながりにより、従来一部の管理者だけが意識していた省エネルギーや快適性の課題をオフィスユーザーや来訪者等が共有し、積極的に関与できるようになる。

④ 快適空間計測制御技術

快適かつ高品質な空間を提供するための技術で人など発熱負荷の所在に応じて空間の温度分布を最適に制御し、迅速かつ高品質で安全な空間を提供する技術を快適空間計測制御技術と Azbil 社では定義している。

以下はその例である。すなわち、気流（風量及び風向）を効果的に活用し、温冷感設定に応じてより快適な居住環境を実現する空調システムを開発している。具体的には、オフィス空間を約 25 m² の小さな単位に区切り、風量や風向を制御する空調方式を開発している。セル単位に「風量が少ない穏やかな環境」から「下方気流による冷涼な環境」までの複数段階の気流創出が可能である。下流気流が適用されることにより、同じ温度設定値でも、涼しさを感じやすくなるため省エネルギーも期待できる。

諸外国では、DR アグリゲーターがサービスの一環として、BEMS を用いエネルギー需要家の機器制御を行っている場合もある。

具体的には、以下の事例が挙げられる。

- ・ シュナイダー・エレクトリック/エナジー・プール:

シュナイダー・エレクトリックは電気設備・機器メーカーである。2010年に産業用 DR アグリゲーターであるエナジー・プールを買収し、電力の節電分のアグリゲーション事業を推進すると共に、工場・大型業務ビルを対象とした省エネルギーサービス事業を展開している。2012年から日本市場に進出している。

- ・ ジョンソン・コントロールズ:

ジョンソン・コントロールズはビル管理システム（Building Automation System）に強みを有する。大型冷凍機で世界1位のシェア、冷凍冷蔵装置で世界3位のシェアを有する。クラウドに BEMS 情報を集約し、データ分析することで、対象設備・機器の不具合を検知す

るなど付加的なサービスを与えるシステムを開発するなど、サービスの高度化に向けた作業を行っている。

- ・ エナノック:

エナノックは、工場、ビル、大型スーパーマーケット、学校等の公共施設を対象としてデ
ィマンドレスポンスサービスを提供する世界最大のディマンドレスポンスアグリゲータ
ーである。アグリゲーションビジネス以外にも、需要家に対してエネルギー需要把握に資
するソフトウェアを提供している。2011年から日本市場に進出している。

10.4.4. 他国の主な研究開発動向

諸外国では、EMSの技術開発よりもスマートグリッド関連技術開発の取組みが顕著である。
具体的には、米国エネルギー省では、スマートグリッドに関連する技術の規格や、高速双方向
通信システム、自動送配電システムの実用化に取り組んでいる。

10.5. 系統（超電導送電）

10.5.1. 開発・導入の必要性

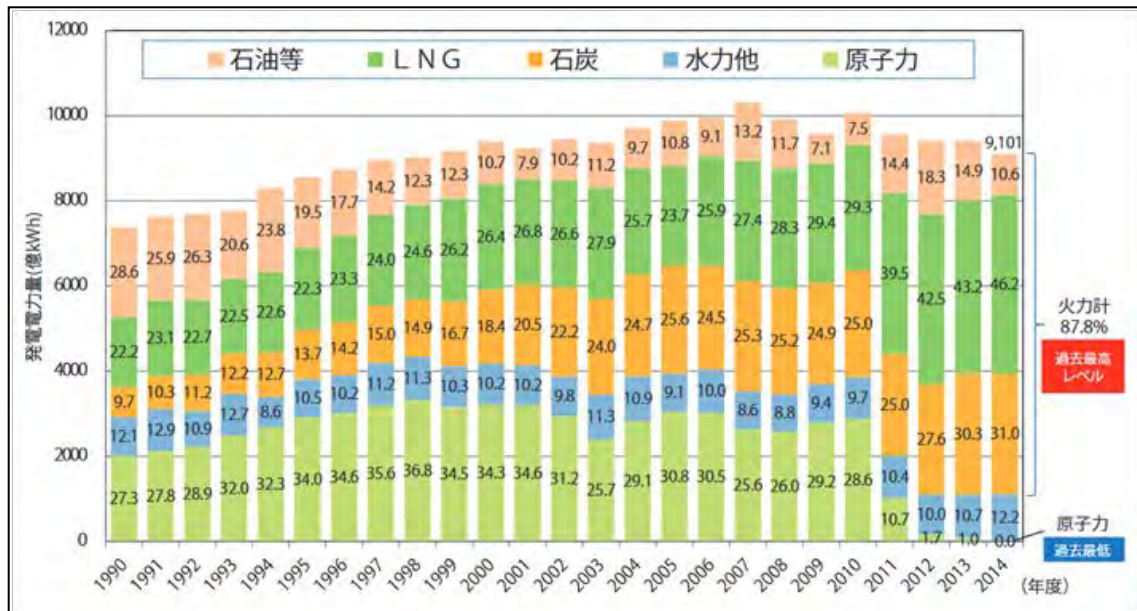
資源に乏しい我が国は、将来にわたり持続的発展を達成するため、革新的エネルギー技術の開発、導入・普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことが重要である。エネルギー基本計画（2014年4月閣議決定）¹⁸⁸や科学技術イノベーション総合戦略2016（2016年5月閣議決定）¹⁸⁹においても、超電導技術などの基盤技術の開発の進展が期待されている。

東日本大震災以降、我が国は一次エネルギー供給の9割以上を化石燃料に依存する状況となっており、とりわけ電源構成に占める火力発電の割合は、2014年度実績で約88%と過去最大の水準で推移している一方で、足元での再生可能エネルギー発電の割合は、12%程度にとどまっている。

2015年7月に決定された長期エネルギー需給見通し¹⁹⁰では、2030年の電源構成の見通しのうち再生可能エネルギーは22~24%と大幅な拡大が見込まれており、火力発電の高効率化とともに、再生可能エネルギーの大量導入を可能とする系統システムの構築が極めて重要である。

今後、再生可能エネルギー利用をさらに向上させるため、分散化する発電所から集中化傾向にある需要地にエネルギーロスをも最小限に抑えて送電を行う技術として期待される高温超電導ケーブルの実用化へ向けた開発が進められている。

図 96 電源別発電電力量の推移



（出所）電気事業連合会、電気事業における環境行動計画（2015年9月）

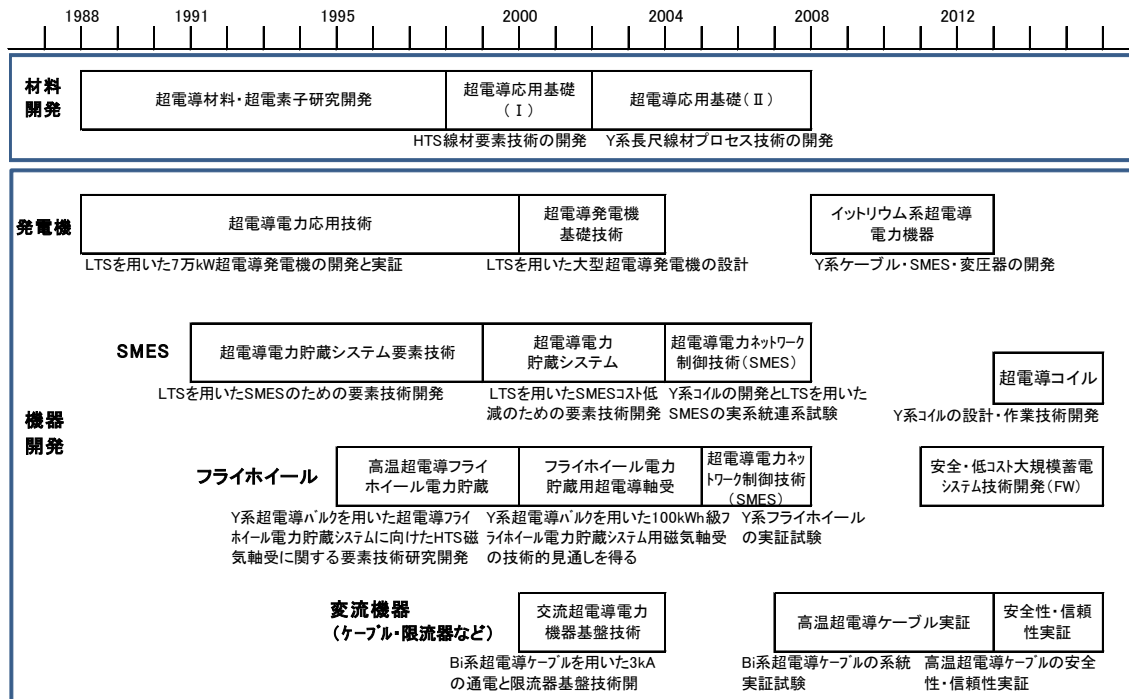
¹⁸⁸ http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf

¹⁸⁹ <http://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/2016/honbun2016.pdf>

¹⁹⁰ http://www.meti.go.jp/press/2015/07/20150716004/20150716004_2.pdf

また、産業・輸送分野等では既存技術による省エネルギーは極限まで進められているが、長期エネルギー需給見通しでは、2030年に省エネ量1,961億kWh（電力需要の17%）の実現が必要とされており、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）技術戦略研究センター（TSC）によると、新しい省エネルギー技術の一つとして、高温超電導技術を適用すると、このうち約10億kWh以上のエネルギー削減への貢献が見込める¹⁹¹、としている。

図 97 超電導分野におけるこれまでの我が国の主な技術開発



(出所) NEDO、TSC Foresight Vol.4 (2015年9月) から弊所作成

10.5.2. 国内の技術開発動向

(1) 技術の概要

超電導現象とは、特定の金属や化合物を超低温に冷却したときに電気抵抗がゼロになる現象であり、今から約100年前に、オランダのライデン大学の物理学者ヘイケ・カメルリング・オンネスにより発見された。超電導体で送電線を作り、電気抵抗による損失なく電気を送る超電導送電は、当初、超電導状態を作り出すために、超電導を絶対零度（セ氏マイナス273度）近くまで冷却しなければならないという課題があった。

その後、比較的高い温度で超電導状態になる高温超電導体の発見により、冷却に高価なヘリウムを使用せず、安価な液体窒素で冷却が可能となったが、ビスマス系やイットリウム系¹⁹²の高温超電導体はセラミックであるため、衝撃や曲げにもろく、細くて長い線材に加工することが難しく、超電導送電の構想は、長らく実用化の目途がつかなかった。

しかし、高温超電導体を使ったケーブル製造技術が進化し、曲げに強く長尺の超電導ケーブ

¹⁹¹ NEDO TSC、TSC Foresight Vol.4 第1章 超電導技術の概要 (2015年10月)

ルの製造が可能となり、超電導送電の実用化が近づいている。超電導体を線材にし、電力ケーブルとして使用すると、既存の同じ径の電力ケーブルと比べて3倍以上の電力を低損失で送電することが可能となる。また、コイルに適用した場合、電流密度が大きくなるため、従来よりもコンパクトで強力なマグネットを作製することが可能となる。このように、超電導体を用いた電力ケーブルやモータなどの電力・産業機器は、コンパクトな形状で大容量送電や大出力を可能にし、既存の電力ケーブルや産業機器に比べて損失を低減することが可能であることから、省エネルギーや地球温暖化対策に貢献することが期待されている。

超電導送電の実現に向けて、長距離での送液冷却システムの技術開発に加えて、実用化に向けた安全性・信頼性検証等が国内外で行われている。日本も含めてこれらのプロジェクトは、各国政府等からの補助金が充てられており、純粋に商業ベースで建設され、運転されたものはまだない状況である。

(2) 主要な国内実証プロジェクト

国内では、超電導送電の実用化に向けた取組みとして、NEDOの高温超電導ケーブル実証プロジェクトにおいて、東京電力、住友電気工業、前川製作所は、東京電力旭変電所（横浜市）に約250mの超電導ケーブルを設置し、2012年10月から電力系統に連系する国内で初めての超電導送電の実証試験を2012年に実施した。本プロジェクトでは、これまでのNEDOの技術開発によって得られた超電導ケーブルの開発成果などを踏まえ、超電導ケーブル単体だけではなく、線路建設、運転、保守を含めたトータルシステムの信頼性を実証するために、実系統に連系した実証試験を実施することによって超電導ケーブルのトータルシステムとしての総合的な信頼性を実証するとともに、革新的な高効率送電技術の開発・検証を行うことを目的に実施した。¹⁹³

表 48 高温超電導ケーブル実証プロジェクト概要

検証項目	・実系統への接続技術、システム構成検討
	・負荷変動への冷却システムの追随性
	・運転監視方法、保守方法の検証
プロジェクト期間	・平成19年～平成25年(7年間)
委託先分担	・東京電力：電力系統解析、超電導ケーブル運転・評価
	・住友電工：超電導ケーブル開発・製造・布設、長期性能検証
	・前川製作所：冷却システム開発・製造・設置、長期性能検証

(出所) 東京電力HP

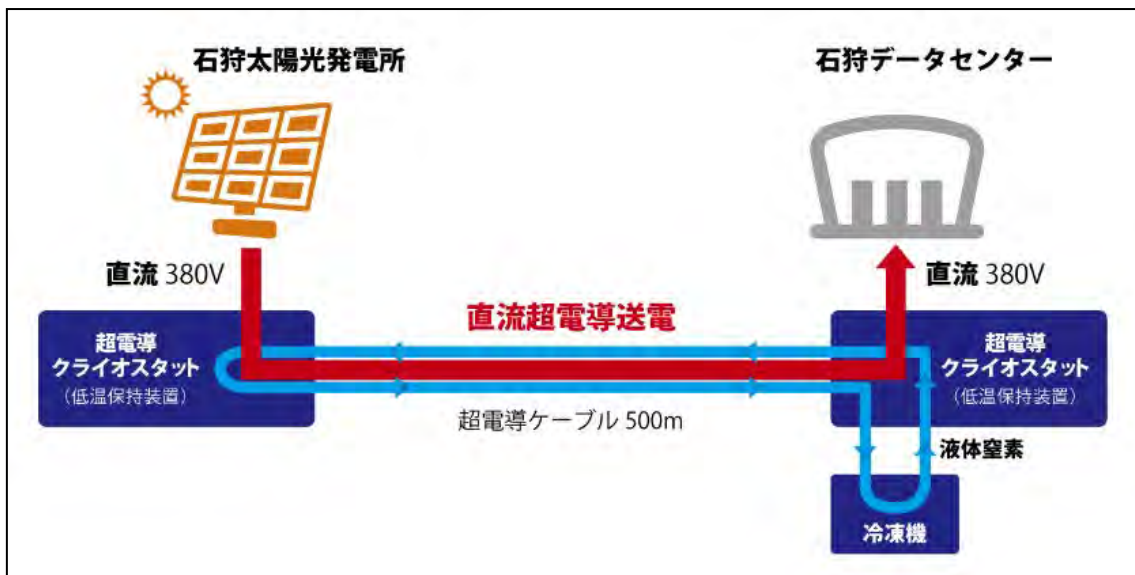
また、超電導直流送電に関する技術開発も進められている。超電導直流送電は、既存の交流送電網と接続する際に電力変換設備が必要になるが、交流損がないため電気抵抗はほぼゼロ、超電導交流送電に比べケーブルの断面積が小さく冷却コストが安い、太陽光発電などの直流で発電される再生可能エネルギーと相性が良いなど、メリットが多い。

2015年9月には、経済産業省の高温超電導技術を用いた高効率送電システムの実証事業に

¹⁹³ http://www.tepco.co.jp/cc/press/2012/1222242_1834.html

において、千代田化工建設、住友電気工業、中部大学、さくらインターネットによるコンソーシアム（石狩超電導・直流送電システム技術研究組合）が、さくらインターネットの太陽光発電所から石狩データセンターへの超電導直流送電を開始した。データセンターへの送電を通じて超電導送電システムの通電安定性を検証し、将来の実用化のための様々な課題を抽出することを目的としており、直流で発電された電力は交流電力に変換されることなく送電され、データセンター内では、直流で動作するサーバに直接給電される。¹⁹⁴

図 98 高温超電導技術を用いた高効率送電システムの実証事業の概要



(出所) 石狩超電導・直流送電システム技術研究組合HP

平成 28 年度以降は、高温超電導実用化促進技術開発基本計画¹⁹⁵の下、平成 24 年度から経済産業省が実施する高温超電導直流送電システムの実証研究及び高温超電導技術を用いた高効率送電システムの実証事業の研究開発成果を共有し、超電導直流送電技術の実証を行い、設計・建設方法及び運用・保守・障害復旧などの基準案策定を電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発として実施される。

(3) 海外の主な実証プロジェクト

a. 米国

米国は、超電導ケーブルの実証試験をもっとも早く始めた国のひとつであり、2006 年頃に Albany プロジェクトにおいて 34.5kV の超電導ケーブルの実証試験を、2008 年には LIPA プロジェクトにて 138kV の超電導ケーブル試験をスタートさせた。HYDARA プロジェクトでは、限流機能付き超電導ケーブルの開発が進められている。現在は 2014 年にニューヨーク・マンハッタン近くの ConEdison 社の系統に 170m 級の超電導ケーブルを建設する計画が進んでいる。

¹⁹⁴ https://www.sakura.ad.jp/press/2015/0924_superconductivity/

¹⁹⁵ <http://www.nedo.go.jp/content/100788555.pdf>

表 49 米国の技術開発動向

	Albany	Columbus	LIPA 1	LIPA 2	HYDARA
定格電圧/電流	34.5kV/800A	13.2kV/3000A	138kV/2400A	138kV/2400A	13.8kV/4000A
ケーブル容量	48MVA	69MVA	573MVA	573MVA	96MVA
長さ	350m	200m	600m	600m	170m
ケーブル構造	三心一括型	三相同軸型	単心型	単心型	三相同軸型
超電導線材	Ph1Bi系、Ph2Y系 (30m部)	Bi線材	Bi線材(3相)	Y系線材(1相)	Y系線材
実証運転期間	2006~2008	2006~2012	2008~2009	2013(予定)	未定
開発段階	終了	終了	終了	運転準備中	開発中
電力会社	National Grid	AEP	LIPA	LIPA	ConEdison
主要メンバー	SuperPower Sumitomo BOC(当時)	Ultera AMSC Praxair	AMSC NEXANS Air Liquid	AMSC NEXANS Air Liquid	Ultera AMSC DH Industries
冷却方式	液体窒素循環 Stirling冷凍機	液体窒素循環 液体窒素減圧冷却	液体窒素循環 Brayton冷凍機	液体窒素循環 Brayton冷凍機	液体窒素循環 Stirling冷凍機

(出所) 低温工学 Vol. 48 (2013)、超電導ケーブルの海外開発動向

b. 欧州

欧州では、実系統に接続して運転された例はまだないが、いくつかのプロジェクトが計画されており、実際に近々に実系統に接続して運転を開始しようとしているものがある。

ドイツでは、AmpaCity プロジェクトにおいて、ビスマス系線材を用いた 10kV/40MVA 級、長さ 1km の三相同軸型超電導交流ケーブルを開発し、平成 26 年春には超電導限流器と組み合わせ実系統試験を実施する計画を発表している。

ロシアでは、液体水素の輸送と、その低温を用いて超電導ケーブルで電力を送電する、ハイブリッド型の Energy Transfer Line (ETL) が開発されている。設計では、30MW のエネルギーを液体水素でとして送り、50MW を超電導ケーブルで送電し、合計 80mW のエネルギーを移送することができる。

表 50 欧州の技術開発動向

	AmpaCity	Amsterdam	St. Petersburg	Hybrid ETL
定格電圧／電流	10kV/2300A	50kV/2900A	DC20kV/2500A	DC20~30kV/3~4kA
ケーブル容量	40MVA	250MVA	50MVA	LH2 30MW + Power 50MW
長さ	1000m	6000m	2500m	12m
ケーブル構造	三相同軸型	三相同軸型	単心型	単心型
超電導線材	Bi線材	未定	Bi線材	MgB2
実証運転期間	2013~(予定)	未定	2016~(予定)	-
開発段階	運転準備中	計画中	開発中	要素開発
電力会社	RWE Deutschland	Alliandar	FGC UES	-
主要メンバー	NEXANS KIT	Ultera	R&D Center of FGC	Russian Scientific R&D Cable Institute
冷却方式	液体窒素循環 液体窒素減圧冷却	未定	液体窒素循環	液体水素

(出所) 低温工学 Vol. 48 (2013)、超電導ケーブルの海外開発動向

c. 韓国、中国

韓国では、平成 23 年から GENI プロジェクトでイットリウム系線材を用いた 22.9kV/50MVA 級、長さ 410m の三心一括型超電導ケーブルの実系統実証試験を実施している。また、JEJU プロジェクトにおいて、80kV/500MVA 級、長さ 500m の超電導直流ケーブル及び 154kV/500MVA 級、長さ 1km の超電導ケーブルを開発して、実系統接続を行った実証試験が計画されている。

中国では、国家ハイテク研究開発プログラム（863 計画）の一環として、変電所からアルミニウム電解工場に連系させる直流ケーブルが開発されている。

表 51 韓国、中国の技術開発動向

	GENI	DAPAS(154kV)	Jeju(DC)	中国・DCケーブル
定格電圧／電流	22.9kV/1260A	154kV/3.75kA	DC±80kV/3100A	DC1.3kV/10kA
ケーブル容量	50MVA	1000MVA	50MVA	13MVA
長さ	410m	100m	500m	380m
ケーブル構造	三心一括型	単心型	単心型	単心型
超電導線材	Y系線材	Y系線材	Y系線材	Bi系線材
実証運転期間	2011~2013	(試験用線路)	2014~(予定)	2012~
開発段階	運転終了	試験終了	開発中	運転中
電力会社	KEPCO	KEPCO	KEPCO	-
主要メンバー	LS cable	KERI LS cable	KERI LS cable	IEE CAS Henan Zhongfu Industrial
冷却方式	液体窒素循環 液体窒素減圧冷却	-	液体窒素循環 Stirling冷凍機	液体窒素循環 Stirling冷凍機

(出所) 低温工学 Vol. 48 (2013)、超電導ケーブルの海外開発動向

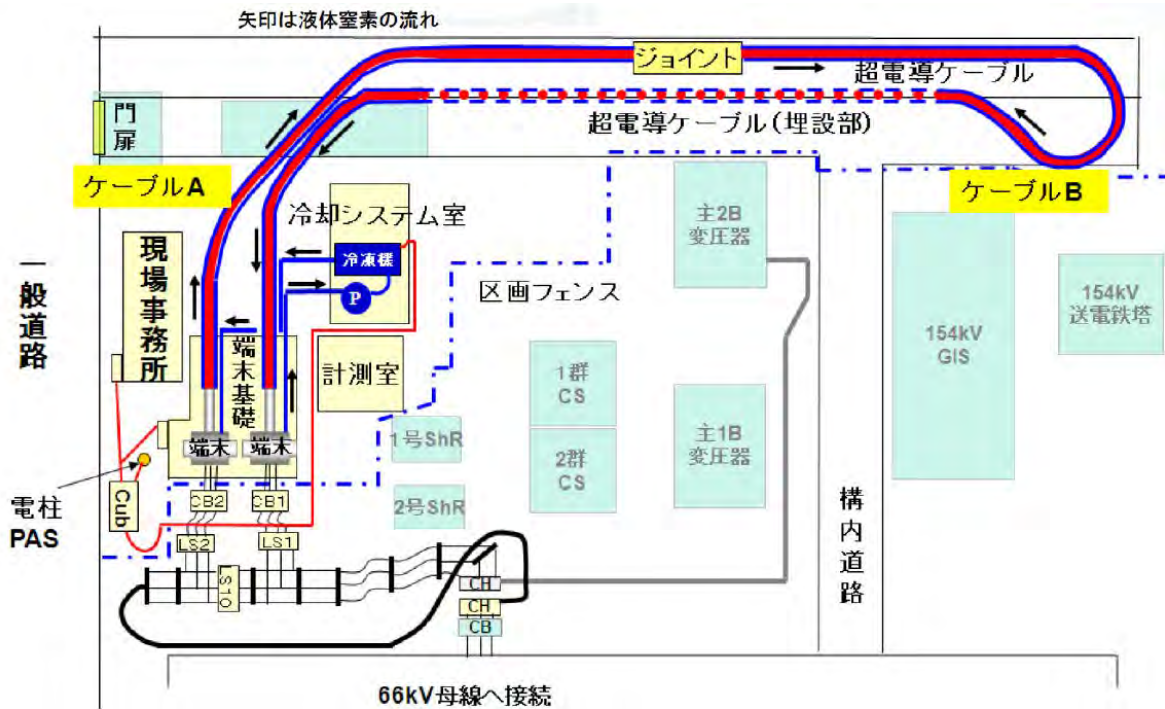
10.5.3. 実用化へ向けた課題

高温超電導ケーブルは、低電圧で大電流を通電できる、及び送電損失がほぼゼロであるという利点がある。加えて、従来のCVケーブル¹⁹⁶と比べると、同じ送電容量であれば小径化できることも利点の一つである。

しかし、従来の電力ケーブルシステムから高温超電導ケーブルシステムへの転換需要を獲得するためには、高温超電導ケーブルに加えて、それを遮熱し、冷却するための管路を短期間に低コストで長距離に渡って施工するための技術、クエンチ（何らかの原因により超電導現象が消失すること）をはじめとする異常時の対策や冷凍機を中心とする冷却システムの信頼性の向上とコスト低減が課題である。図99は、NEDOの高温超電導ケーブル実証プロジェクトの概要図であり、冷凍機を用いて液体窒素を使い-200℃まで冷却し、液体窒素を循環ポンプでケーブルに送り込むことで電気抵抗ゼロの超電導状態を保っている。

社会実装のためには冷凍機及び冷却システムのコンパクト化や冷却可能な距離の延伸等が課題として残されている。

図99 高温超電導ケーブル実証プロジェクトにおける現地レイアウト



(出所) NEDO 高温超電導ケーブル実証プロジェクト (NEDO 省エネルギー技術フォーラム 2013)

10.5.4. 市場規模

新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 技術戦略研究センター (TSC) によると、超電導ケーブルは、従来の地中ケーブルに対して送電損失を 1/2 程度に抑えられることから、例えば、110kV 以上 275kV 以下の地中ケーブルのうち 20%が超電導ケーブルに置き換わり、ケー

¹⁹⁶ 架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル

ブルの年間平均利用率を50%と仮定した場合、年間51GWhの省エネルギー効果が得られると見込まれる。なお、超電導ケーブルを用いた送電システムの国内の市場規模は、平成42年において首都圏を中心に年間105億円程度見込まれる、としている。

また、超電導技術を適用した機器の世界市場規模は、年間約7,000億円といわれ、その大半はLTSにおけるMRIと研究開発用途(高磁場の発生を要する設備や部品)で占められており、その他の超電導適用機器の市場は形成されていないのが現状である。一方、電線・ケーブルの世界市場は年間約20兆円の規模があり、うち電力インフラ用途がその約5割を占めている。高温超電導電力ケーブルの実用化が進めば大きな市場を創出することが期待されており、2030年には年間約1兆円規模の世界市場が形成されるとの見通しである、としている。¹⁹⁷

10.5.5. 国内企業、競合相手

(1) 高温超電導線材

ビスマス系(Bi)系線材は、ビスマス(Bi)・ストロンチウム(Sr)・カルシウム(Ca)・銅(Cu)・酸素(O)で構成され、特にBi(一部Pb)、Sr、Ca、Cuの組成比が2:2:2:3となる2223相は臨界温度が110Kと高く、発見直後から最も実用化に近い材料として注目されてきた。主な企業は、住友電気工業、Bruker(ドイツ)である。ただし、Bi2223線材の製造においては、製造工程に特徴を有する住友電気工業が独占の状態である。

イットリウム(Y)系線材は、高温超電導体¹⁹⁸の一種で、イットリウム(Y)・バリウム(Ba)・銅(Cu)・酸素(O)から構成される酸化物である。なお、イットリウム系とはイットリウムを他の希土類元素(例えば、Gd, Sm等)で置換した超電導材料の総称である。イットリウム系線材は臨界電流密度が大きく、液体窒素中では電気抵抗ゼロで大電流を流すことができ、磁場中での通電特性も良好であることから、機器の小型化や省エネの観点から実用化が期待されている。また、この線材は従来のビスマス系線材と比較して、被覆材として使われている銀の使用量が極めて少ないことから、特性の高さと共に低コストの線材として期待されている。主な企業は、古河電気工業(Super Power)、フジクラ、AMSC(米国)、SuNAM(韓国)であり、日米韓の競合状態。最近では韓国の技術的な猛追が著しい。

MgB₂(二ホウ化マグネシウム)は、2001年日本で発見された新規超伝導体で、その遷移温度は39Kと金属系超伝導体としては最も高い値を有している。また、他の高温超伝導体と比較して弱結合が大きな問題にならない点などから、実用化への研究が盛んに行われている。¹⁹⁹主な企業は、Columbus(イタリア)、Hyper Tech(米国)、日立製作所であり、日米欧において実用化へ向けた研究が進められている状況。

¹⁹⁷ NEDO TSC、TSC Foresight Vol.4 第1章 超電導技術の概要(2015年10月)

¹⁹⁸ 安価な液体窒素温度(-196℃)以上の温度でも超電導状態となる物質を指す

¹⁹⁹ <http://www.nims.go.jp/TML/japanese/research09.html>

表 52 超電導材料の種類と特徴

温度	材料	臨界温度	製造方法	材料特性	特徴
高温 HTS	銅酸化物系-Bi系 (1988年:発見) (1996年:長尺線材)	110K 液体ヘリウムに比べて 低コストの 液体窒素温度(77K) で利用可能 である	粉末充填/延伸 ・ 長尺化、量産性が確認されている	・比較的、低磁場領域 (~10T)での使用に適する	・冷媒単価(数十円/ℓ)が安価であり、冷却コストが低い
	銅酸化物系-Y系 (1987年:発見) (2006年:長尺薄膜線材)	90K 液体ヘリウムに比べて 低コストの 液体窒素温度(77K) で利用可能 である	薄膜形成 ・ Bi系に比べて必要とする貴金属が少なく、材料コストで優位である ・ 量産技術の確立まで今一步である	・ 高磁場下でも高い臨界電流特性を有する	・材料コスト、材料特性ではBi系に対して優位である ・長尺化や量産技術の確立までは今一步である
	Fe系 (2008年:発見)	55K 液体水素温度(20K)で 利用できる可能性がある	—	・20~30℃以上の高磁場中(@4K)での臨界電流特性が比較的良い	・強磁場下での使用に有利であり、液体窒素温度までの使用温度域の向上やヒ素の代替ができれば、産業応用の可能性が広がる
	MgB₂ (2001年:発見) (2004年:長尺線材)	39K 液体水素温度(20K)で 利用できる可能性がある	粉末充填/延伸 ・結晶粒同士の結合が良好であり、結晶粒の向きを揃えなくても良い ・原料が比較的安価である	・機械的強度に優れる ・軽量である	・良好な機械的特性は高磁場下での使用に有利であり、使用温度域が液体窒素温度まで向上すれば、産業応用の可能性が広がる
低温 LTS	Nb₃Sn (1967年:発見)	18K 液体ヘリウムでの冷却が必要なため 冷却コストが高い	延伸 ・材料の製造法が確立され材料コストも低く、 安価に製造できる	・高磁場下であっても比較的高い臨界電流特性を有する	・線材は最も低コストで使用実績も豊富であるが、多くはコストの高い液体ヘリウム(1000円/ℓ以上)を必要とする
	NbTi (1964年:発見)	18K 液体ヘリウムでの冷却が必要なため 冷却コストが高い			

(出所) NEDO、TSC Foresight Vol.4 (2015年9月)

(2) 冷凍システム

高温超電導の冷却に最適な冷凍機については、65K 級のものを前川製作所、太陽日酸、Air Liquide (フランス) が、20K 級のものを住友機械工業等が開発を行っている。液体窒素ポンプについては、バーバーニコルス (米国) が市場を独占している状態。

10.6. 系統（高圧交流送電及び高圧直流送電、並びに低ロス送電線を含む）

10.6.1. 開発・導入の必要性

電力輸送に係る方式はこれまで交流送電が主流であり、送電ロスを減少するためにひたすら電圧を上げて高圧送電、超高圧送電、さらに超々高圧送電（500kV以上）を採用している。しかし、交流送電では送電距離が長くなると送電電力損失が大きくなるデメリットがあるため、高圧直流送電の採用が広がるようになっている。また、近年急速に普及されている風力や太陽光発電など再生エネルギー発電がもともと直流発電のため、直接直流送電が望ましいことも拍車をかけている。さらに、家庭、オフィスビル、データセンターなど需要側で見た場合でも最終的に電力を消費する機器がほとんど直流を必要としているため、直流送電の場合、電力変換設備が省かれるため経済的にメリットがあるほか、複数の交直流変換も省かれて省エネルギーにもなるため、直流送電の需要が高まっている。また、東京理科大学大学院イノベーション研究科橘川武郎教授によれば、日本のようにほとんど交流送電方式からなる電力系統の場合に生じる迂回潮流を減らせるメリットもある。この迂回潮流は、太陽光や風力などの再生可能エネルギーによる発電が普及すると分岐が増加することでいっそう増大するが、直流送電はそれを抑制する機能を果たせる。すなわち、高圧直流送電方式は、再生可能エネルギー電源の普及を促進する意味合いを持つ²⁰⁰。

HVDC 技術を最初に開発と導入したのはスイスの ABB であり、現在 ABB は市場の半分を占めている模様である。またドイツの Siemens も 3 割程度を占めていると言われている。一方、2014 年 12 月 ABB は日立と共同出資して、日本国内向け高圧直流送電事業の合弁会社の設立を合意し、2015 年 11 月より営業を開始した。

10.6.2. 国内の技術開発動向

日本は電力需要の急増が背景に早くも 1970 年代から 110 万ボルトの送電技術を研究・開発しはじめた。1980 年代になると、電力会社や大学の研究者、メーカーなど結集して取り組んだ結果、110 万ボルト送電が日本の実情に適していることと技術的に実現可能なことが確認された。1990 年で東京電力は原子力発電所のある柏崎・刈羽（新潟県）、福島と首都圏を結ぶ 2 つのルートに 110 万ボルト送電線を完成させた。現在は実際半分の 55 万ボルトで稼働している。それに関連した変圧器や絶縁器、避雷器など 110 万ボルトに対応する装置を三菱電機、東芝、日立製作所とともに開発した²⁰¹。

ちなみに、2009 年国際電気標準会議（IEC）は日本の 110 万ボルトの送電技術を IEC 標準規格として採用した。

一方、直流送電に関しては、日立は 1970 年の開発以来、日本国内のすべての直流プロジェクトに関与し、トップの実績を持っていると報告されている²⁰²。

²⁰⁰ <http://www.world-economic-review.jp/impact/article665.html>

²⁰¹ http://www.nikkei.com/article/DGXNASFK2500W_V21C10A000000/

²⁰² http://www.hitachi.co.jp/products/infrastructure/product_solution/energy/smartgrid/power_electronics/hvdc.html

北海道と本州の北本連系は本州・上北変換所と北海道・函館変換所間を結ぶ、日本初の本格的な直流送電であり、1979年運転開始で送電距離167km（うちケーブル部分43km）、運転電圧±250kV、容量60万kW、電源開発所有となっている。また、紀伊水道直流連系は本州・北変換所と四国・阿南変換所間を結ぶ、世界最大級の設計電圧である直流送電であり、2000年運転開始、送電距離100km（うちケーブル部分49km）、運転電圧±250kV、容量140万kW（設計電圧±500kV、設計容量280万kW）で、電源開発・関西電力・四国電力共同所有となっている²⁰³。



図 100 日本・日立の直流送電実績
出典：北海道・本州間電力連系設備²⁰⁴

一方、NEDOは電力消費の特性に応じた、需要側に近い次世代の直流送電技術の実証実験を開始している。NEDOは2008年よりネットワークが扱う情報量は急激に増大し、IT機器やネットワーク機器が消費する電力の増加を背景に、「グリーンネットワーク・システム技術研究開発プロジェクト（グリーンITプロジェクト）」（2008～2012年度）として、データセンター等の省エネ化を図るための革新的手法の一つである高電圧直流（HVDC）給電システムの技術開発と導入推進を行っていた²⁰⁵。同プロジェクト下では、日本電気株式会社と三菱電機株式会社がそれぞれよい実証結果を得られたようである。

NECはデータセンターの空調電力を最大50%削減する省エネ冷却技術を開発した。この技術により、機器から排出される熱を、拡散する前に回収するとともに、直接屋外へ輸送し、サーバーーム内の空調負荷を大幅に削減する仕組みである。ラック当たり12kWの消費電力の場合、送風電力と冷凍機電力を合計した空調電力を最大50%削減することが可能とされている。

ちなみに、NECは2012年時点直流電圧380V対応の新型サーバーとして「エクスプレス5800/シグマブレードM（DC380ボルト対応版）」を発売していた。同製品は従来製品に比べ、デ

²⁰³ <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B4%E6%B5%81%E9%80%81%E9%9B%BB>

²⁰⁴ <http://www2.iee.or.jp/ver2/honbu/30-foundation/data02/ishi-06/ishi-2021.pdf>

²⁰⁵ http://www.nedo.go.jp/activities/DA_00036.html

ータセンター全体の消費電力を最大20%削減できるとされている²⁰⁶。

三菱はデータセンターのサーバーなど情報通信技術（ICT）関連機器の給電を380Vの高電圧直流（HVDC）化し、システム全体の電力損失低減により省エネを実現する高電圧直流給電システム「MELUPS DECO」を製品化することに成功した。システム変換効率は、従来の交流200V給電比9ポイント向上して97%を実現したほか、高電圧化により、配線ケーブルの細径化ができ、設備コスト低減が可能となった。

NEDOは、その事業の一貫として、2015年8月11日に、米国テキサス州政府との間で、HVDC給電システムの普及に向けた協力を進めていくことに合意し、基本協定書（MOU）を締結した。このMOUに基づき、2016年8月NEDOと（株）NTTファシリティーズは、米国テキサス州のテキサス大学オースチン校と共同で、データセンターの省エネ化を実現するための高電圧直流（HVDC）給電システムを同校内に導入し、実証試験を開始した²⁰⁷。この実証試験は、同校内の先端コンピュータセンターに、大容量HVDC電源装置やリチウムイオン電池などを組み合わせた省エネ実証システムを導入することにより、従来のシステムに比べ15%の省エネ効果実現を目指すものとしている。同校に導入された省エネ実証システムは、500kW級の大容量HVDC電源装置（整流装置及び分電盤）、リチウムイオン電池及びHVDCに対応したサーバー、空調設備及び照明機器並びに太陽光発電システムで構成されて、送電電圧は380VDCとなっている。

10.6.3. 他国の主な研究開発動向

ABBによると、世界中の直流送電システムの約半分を占める約90件、95000メガワット相当の直流送電プロジェクトを手掛けている。ABBはHVDCのコア技術にあたる電力用半導体素子、変換所、高圧ケーブル等HVDCシステムの主要機器を自社で製造している²⁰⁸。

ABBは、2014年8月ブラジル、リオマデイラの直流送電システム向けの交直変換所の運用試験を終え、アベンゴア社に納入した。このプロジェクトは送電距離が約2400kmで、送電容量が3150メガワットの直流送電システムであり、送電線路として世界最長である。この送電プロジェクトはブラジル北西に位置する2基の水力発電所からブラジルの主要な経済都市、サンパウロへと電力を供給することとなっている。

2015年1月ABBは、ノルウェー・デンマーク間の直流送電（HVDC）を完工した。このプロジェクトは多くの水力、風力電源を地域の電力システムへ導入することを目的の1つとしていた。それによって、ABBはスカゲラク海峡の4本の連系送電線の全てを納入した。スカゲラク第1、第2リンクは1970年代、第3リンクは1993年であり、今回の最新のプロジェクトで4リンクを含めると、システム長は240キロメートルで、北海のスカゲラク海峡を横断し、170万キロワットの送電容量となった²⁰⁹。

2015年9月、ABBは、岡山県に建設される日本最大級の太陽光発電所の接続箱を受注した。

²⁰⁶ http://www.nikkei.com/article/DGXNASDD010RN_S2A200C1000000/

²⁰⁷ http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100622.html

²⁰⁸ <http://www.abb.co.jp/cawp/seitp202/f897a1f0512e2a1fc1257d43003bed93.aspx>

²⁰⁹ <http://www.abb.co.jp/cawp/seitp202/6bcc41c916e08874c1257dd2002973f2.aspx>

当プロジェクトは、GE エナジー・フィナンシャルサービス、東洋エンジニアリング株式会社、株式会社中電工、くふうみアセットマネジメント株式会社が出資するもので、約 230 メガワットの規模を誇り、本州の西側、瀬戸内地域での再生可能エネルギー利用に弾みをつけるものとして、ABB は発電所の建設を EPC として担う東洋エンジニアリング株式会社から接続箱を受注した。

10.6.4. 低ロス送電線技術²¹⁰

日本の電力ケーブル（60kV 級以上電力ケーブルの OF ケーブル(Oil-Filled cable)、POF ケーブル(Pipe type Oil Filled cable) および CV ケーブル(Cross-linked polyethylene insulated cable)）の技術開発の歴史は主に高電圧化および大電流化に対する材料とその構造の改善の歴史であり、いかにしてコンパクト化ができ、低損失化できるかにある。

日本は 1950 年代後半以降、海外技術をベースとした国産技術の発展が図られた。例えば鉛被に代わって波付きアルミ被を実用化した。絶縁体の低損失化を図るため脱イオン水洗紙および合成油を実用化した。内外半導電層と絶縁層の 3 層同時押出方式を開発し、CV ケーブルの実用化をするとともに絶縁性能を向上させた。

1970 年以降は、自主技術で国産化が進められていた。例えば、長距離 500kV OF ケーブル線路の建設の目標に合わせて、日本独自の低損失の半合成紙の開発が進められた。CV ケーブルについては、日本独自の乾式架橋製造方式が開発され、CV ケーブルの絶縁性能を著しく向上させた。これらの技術をもとに、1979 年に世界で初めての 275kV CV ケーブルが布設された。

1980 年以降は日本独自技術が世界トップレベルに躍進した。例えば導体の低損失化のため、世界で初めての酸化第二銅皮膜を有する素線絶縁導体が開発され、275kV POF ケーブルに適用され大電流化を果たした。絶縁性能に対して欠陥となる異物混入を阻止するため、材料から製造まで徹底したクリーン化が進められ、1988 年には、発電所の引出し線として 500kV CV ケーブルが世界で初めて実用化され、1989 年には長距離 275kV CV ケーブル線路(絶縁厚 27mm)が実用化された。

現在、日本の低ロス送電線は世界トップレベルで製品化が進められている。世界トップレベルの 500kV ケーブル技術を確立し、これをベースに大容量線路として、本四連系線 500kV 半合成紙絶縁 OF ケーブル(絶縁厚 25mm)、紀伊水道横断直流 500kV 海底 OF ケーブル(絶縁厚 22.5mm)、新豊洲線 500kV CV ケーブル(最小絶縁厚 27mm)が実用化された。既に 10 年以上の運転がされている。

また、現在特に低ロス送電線技術²¹¹として、Low Electrical Power Loss Aluminum Conductors Aluminum-Clad Steel Reinforced (LL-ACSR/AS)や Thermal Resistant Aluminum Alloy Conductors Steel Reinforced LL-TACSR/AS の日本の技術の活用が期待されている。これらの低損失電線は従来の ACSR 電線と同径であってもアルミ部分の断面積を増やすことで電気抵抗を低減している。

²¹⁰ <http://sts.kahaku.go.jp/diversity/document/system/pdf/080.pdf>

²¹¹ http://open_jicareport.jica.go.jp/pdf/12040176.pdf

日本の電力ケーブルの産業戦略²¹²としては①国内市場を先進技術・製品の実証の場と位置づけ、ユーザーと連携して世界最高水準の製品を開発・供給、②国内で培った超高压ケーブル等の優れた技術・製品を核に海外展開。③必要に応じ ODA の活用や、EPA や投資協定によるビジネス展開の円滑化を図るとしている。2004 年実績で、世界の電線メーカー10 社の内、日本は4 社（1 位の住友電気工業、4 位の古河電気工業、5 位のフジクラ、9 位の住電日立ケーブル）を占めていた。2014 年には1 位がイタリアの Prysmian 社、2 位がフランスの Nexans、3 位がアメリカの General Cable、4 位が住友電気工業となっている。近年では韓国、中国勢などが市場参入している²¹³。

住友電工によれば²¹⁴、低ロス送電線は会社の強みの1つとして、低ロス電線による送電ロスの低減と送電事業性向上ができることをアピールしている。また、古河電工によれば、古河は2011年に世界最高の電圧階級となる275kV超電導ケーブルを開発した。同成果はNEDO事業「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト（プロジェクトリーダー:塩原融 超電導工学研究所所長）」の支援を受けたものである。

日本電線工業会の統計²¹⁵によると、2015年度、電力ケーブルの国内出荷は導電線59.6kt、アルミ電線19.2ktとなっている。電力電線の輸出は銅電線が18.043kt、アルミ電線は0ktで、金額ベースでは186.95億円となっている。

²¹² http://www.meti.go.jp/policy/nonferrous_metal/strategy/cable_summary.pdf

²¹³ <http://www.prysmiangroup.com/en/corporate/media/news/Prysmian-reconfirmed-1-Global-Wire-and-Cable-Producer/>

²¹⁴ <http://www.sei.co.jp/products/overhead/>

²¹⁵ <http://www.jcma2.jp/toukei.html>

10.7. バーチャルパワープラント

10.7.1. 開発・導入の必要性

バーチャルパワープラント（VPP：Virtual Power Plant）とは、仮想発電所のことである。近年再生エネルギーの導入・普及促進により変動型電源の増加により系統の安定性と信頼性を維持するため、従来の電源に加えて、分散されている風力、太陽光、地熱等の分散型電源を加え、さらに需要側の需要調整（デマンドレスポンス（DR）や電気自動車、蓄電池等も対象にしてすべてのエネルギーリソースをあたかも1つの発電所のように捉える考え方である。これに対して DERMS(Distributed Energy Resource Management System)は VPP の基盤制御技術として位置づけられるようになっているが、DR (Demand Response) や SG (Smart Grid) や SC (Smart Community) 等個別技術を統合した、創エネ、蓄エネ、省エネを網羅した技術として位置づけられている。²¹⁶ VPP・TERMS は離島や島嶼国といったオフグリッド地域において応用されているほか、グリッド網が整備されている地域でも応用が広がっている。

日本では最初に VPP の技術概念が登場したのは 2012 年電力システム改革の一貫として、送電部門の広域化と中立化を目指すためツールの 1 つとして紹介された²¹⁷。その際は「VPP の一般的な定義は、発電所を特定化せずに特定電力会社からの卸電力購入権として卸電力を競売する制度をいう」として定義し、あくまでも電力システム改革の側面を捉えていた。

2014 年 9 月、日本経済再生本部の下に設置されている産業競争力会議のワークショップグループの 1 つである改革 2020WG では、「技術等を活用した社会的課題の解決・システムソリューション輸出」を重点政策の 1 つに取り上げて、具体的な政策課題の 1 つとして、これまでの大規模集中型発電システムと、分散型発電システムが調和したエネルギー・システムへと変革するため、エネマネ技術、蓄電技術、水素・燃料電池技術などを活かし、需要家側の分散電源を有効に活用することで強靱なエネルギー・システムを構築する考えが示され、それを推進するためのプロジェクト「需要家側エネルギー資源を統合的に活用する仮想発電所の構築」案がまとまったという²¹⁸。また、同 WG の第 6 回会合（2015 年）が公開した報告書「ゼロエミッションの実現を目指すリソースアグリゲータ」²¹⁹では VPP に近い概念として「リソースアグリゲータ」が紹介され、具体的には「本研究会で提案する「リソースアグリゲータ」は、再エネ発電所（太陽光発電、風力発電等）、需要家負荷、需要家側に分散設置した蓄電池等のエネルギー機器（リソース）を統合制御（アグリゲータ）し、各者に様々なサービスを提供する。関係する各者がメリットを享受できるようサービスを設計、提供することにより、その対価をリソースアグリゲータが受け取る仕組みを構築する」として、ビジネスモデルの側面が強調されていた。

²¹⁶ Virtual power plants: Moving beyond demand response to an integrated solution

<http://www.utilitydive.com/news/virtual-power-plants-moving-beyond-demand-response-to-an-integrated-soluti/405674/>

²¹⁷ 経済産業省第 6 回電力システム改革専門家委員会資料

http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/sougou/denryoku_system_kaikaku/pdf/006_03_00.pdf

²¹⁸ 「VPP とエネルギーリソースアグリゲーションその 4」<https://www.itrco.jp/wordpress/2016/05/vpperab4/>

²¹⁹ 産業競争力懇談会報告書（2015）<http://www.cocn.jp/thema77-L.pdf>

日本国内で VPP の概念が高いレベルで確立したのは 2015 「日本再興戦略・改訂 2015」²²⁰、ないし 2016 年「日本再興戦略 2016」²²¹において、「革新的エネルギーマネジメントシステムの確立」という戦略目標において、「分散して存在している再生可能エネルギー発電設備や蓄電池等と、高度な需要管理手法であるディマンドリスポンス等を統合的に制御・活用することで、あたかも一つの発電所（「仮想発電所（VPP:Virtual Power Plant）」）のように機能させる効率的なエネルギーマネジメント手法を確立する」とした。同「戦略 2016」では、日本現状の取組状況として①再生可能エネルギーの出力予測のための気象観測・予測データ活用等に向けた技術開発を実施している。②本年（2016年）1月にエネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネス検討会を設置し、エネルギー機器の遠隔制御に係る通信規格の整備等について検討を開始した。とした上で、主な課題・今後の取組としては、①VPP 事業に係る有識者によりプロジェクト採択、進捗管理を行う「VPP 事業委員会（仮称）」において、本年度中に実証事業の実施者を決定し、プロジェクトの実施主体や実施場所を明確化する。②蓄電池の群制御技術等の確立に向けた取組を進めるとともに、引き続き通信規格の整備やサイバーセキュリティの確保に向けた検討を進める。また、来年中のネガワット取引市場の創設に向けて「ネガワット取引に関するガイドライン」の改定等を行う」とした。このように、日本では VPP が 2015 年から概念として確立し、2016 年より本格的に実証が開始された。

10.7.2. 国内の技術開発動向

日本では 2016 年より補助金事業として VPP の実証事業が開始された²²²。事業の目的としては、東日本大震災後、従来の大規模集中電源に依存した硬直的な供給システムを脱却するとともに、急速に普及している再生可能エネルギーを安定的かつ有効に活用していくことが喫緊の課題となっているため、こうした状況に対応するため、高度なエネルギーマネジメント技術により、電力グリッド上に散在する①再生可能エネルギー発電設備や②蓄電池等のエネルギー設備、③ディマンドリスポンス等需要家側の取組を統合的に制御し、あたかも 1 つの発電所（仮想発電所）のように機能させる実証事業等を実施し、また、エネルギー設備や需要家等の地理的な分布が与える影響についても検証する。こうした創エネ、蓄エネ、省エネを最適に組み合わせることにより、再生可能エネルギーの導入拡大、更なる省エネルギー・負荷平準化を図る。

同事業の目標として、平成 28 年から平成 32 年までの 5 年間の事業を通じて、50MW 以上の仮想発電所の制御技術の確立等を目指し、更なる再生可能エネルギー導入拡大を推進する。また、節電した電力量を売電できる「ネガワット取引市場」（平成 29 年までに創設予定）における取引を見据えたアグリゲーターの機器制御技術の高度化を図るとしている。

同補助金で公募した結果、6 月と 7 月にそれぞれ 7 件の VPP 構築事業（A 事業）と 19 件の高度制御型デマンドレスポンス実証事業（B 事業）が採択された。

²²⁰ 「日本再興戦略」改訂 2015 <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/dai18/siryou1.pdf>

²²¹ 「日本再興戦略 2016」http://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/2016_zentaihombun.pdf

²²²VPP 補助金事業の概要（2016）http://new-energy-guide.jp/wp-content/uploads/2016/02/meti_18.pdf

バーチャルパワープラント構築事業費補助金

平成28年度予算案額 **29.5億円（新規）**

省エネルギー・新エネルギー部
 新産業・社会システム推進室
 03-3560-2492

事業の内容

事業目的・概要

- 東日本大震災後、従来の大規模集中電源に依存した硬直的な供給システムを脱却するとともに、急速に普及している再生可能エネルギーを安定的かつ有効に活用していくことが喫緊の課題となっています。
- こうした状況に対応するため、高度なエネルギーマネジメント技術により、電力グリッド上に散在する①再生可能エネルギー発電設備や②蓄電池等のエネルギー設備、③デマンドレスポンス等需要家側の取組を統合的に制御し、あたかも一つの発電所（仮想発電所）のように機能させる実証事業等を実施します。
- また、エネルギー設備や需要家等の地理的な分布が与える影響についても検証します。
- こうした創エネ、蓄エネ、省エネを最適に組み合わせることにより、再生可能エネルギーの導入拡大、更なる省エネルギー・負荷平準化を図ります。

成果目標

- 平成28年から平成32年までの5年間の事業を通じて、50MW以上の仮想発電所の制御技術の確立等を目指し、更なる再生可能エネルギー導入拡大を推進します。
- また、節電した電力量を売電できる「ネガワット取引市場」（平成29年までに創設予定）における取引を見据えたアグリゲーターの機器制御技術の高度化を図ります。

条件（対象者、対象行為、補助率等）

国

補助

→

民間団体等

補助（定額、1/2）

→

民間事業者等

事業イメージ

事業例①：蓄電池等のエネルギー設備を活用したビジネスモデルの確立

事業例②：高度制御型デマンドレスポンス

図 101 日本のVPP補助金事業（経済産業省）

表 53 採択されたVPP構築事業（A事業）

事業テーマ	事業者名
1) 関西VPPプロジェクト	関西電力株式会社 富士電機株式会社 株式会社G Sユアサ 住友電気工業株式会社 日本ユニシス株式会社 株式会社NTTスマイルエナジー 株式会社エネゲート エリーパワー 株式会社 株式会社大林組 一般財団法人関西電気保安協会 株式会社ダイヘン NatureJapan株式会社 三菱商事株式会社 株式会社三社電機製作所
2) スマートレジリエンス・バーチャルパワープラント構築事業	東京電力エナジーパートナー株式会社 横浜市 I B J L 東芝リース株式会社

3) 蓄熱槽を含む多彩なエネルギーリソースを活用したバーチャルパワープラントの構築	アズビル株式会社 東京電力エナジーパートナー株式会社 株式会社三菱地所設計 明治安田生命保険相互会社 日本工営株式会社
4) バーチャルパワープラント構築を通じたリソースアグリゲーションビジネス実証事業	日本電気株式会社 株式会社グローバルエンジニアリング 積水化学工業株式会社 東京電力ホールディングス株式会社 東京電力パワーグリッド株式会社 東京電力エナジーパートナー株式会社 株式会社東光高岳 三井物産株式会社 ONEエネルギー株式会社
5) IoTとビッグデータを活用した先駆的VPP実証事業	株式会社エナリス KDDI株式会社 京セラ株式会社 日産自動車株式会社 フォーアールエナジー株式会社 エコ・パワー株式会社
6) 壱岐島における再エネ出力制御回避アグリゲーション実証事業	S B エナジー株式会社
7) コンビニエンスストアにおける需要家側VPPシステム構築実証事業	株式会社ローソン 慶応義塾大学SFC研究所

表 54 採択された高度制御型デマンドレスポンス実証事業 (B 事業)

事業テーマ	事業者名
1) 蓄電池を活用した高度制御型デマンドレスポンス実証事業	株式会社NTTファシリティーズ
2) DRシステムを活用したネガワット取引の有効性評価実証事業	大崎電気工業株式会社 日本カーボンマネジメント株式会社
3) 既設BEMSを活用したAutoDRや蓄熱槽を含む多彩なDRによるネガワット取引実証	アズビル株式会社 東京電力エナジーパートナー株式会社
4) 高度制御によるデマンドレスポンスの有効性評価を行う技術実証	株式会社グローバルエンジニアリング 株式会社東光高岳
5) N A S 電池システムによる高度制御型DR実証事業	東京電力エナジーパートナー株式会社
6) 高度制御型DR実証事業 (東京電力供給地域)	東京電力パワーグリッド株式会社
7) 運転予備力調達型DRの高精度化に向けた実証	株式会社東芝
8) 高度制御型DR実証事業 (関西電力供給地域)	関西電力株式会社
9) 高度制御によるデマンドレスポンスの有効性評価を行う技術実証 (関西電力エリア)	株式会社グローバルエンジニアリング
10) 商業施設・工場向け自動DR技術実証	京セラ株式会社

1 1) 高度制御によるデマンドレスポンスの有効性評価を行う技術実証	東邦ガス株式会社 株式会社グローバルエンジニアリング
1 2) 高度制御型DR実証事業（中部電力供給地域）	中部電力株式会社
1 3) 関西電力管内における高度制御型デマンドレスポンス実証事業	大阪瓦斯株式会社
1 4) DRサービスに向けての実証事業	三菱電機ビルテクノサービス株式会社
1 5) 実取引を志向した高度制御型DR実証事業	関西電力株式会社 関電ファシリティーズ株式会社 Comverge Japan株式会社
1 6) 蓄電池の群制御によるネガワット取引の技術実証	株式会社エナリス
1 7) 需要家特性に応じたデマンドレスポンス実証事業	Comverge Japan株式会社 東京ガスエンジニアリングソリューションズ株式会社
1 8) 調整力DR実証（東京電力・関西電力・中部電力管内）	丸紅株式会社 エナノック・ジャパン株式会社
1 9) 定量的・動的DR運用のための基盤技術の研究	学校法人早稲田大学

6月に採用されたVPP実証事業の概要は以下の通りである。

1) 関西VPPプロジェクト実証事業²²³

同事業は電力自由化や電力システム改革を背景に社会全体として効率的なエネルギー利用に資するエネルギーインフラの基盤構築に向けて、従来にない新たなエネルギーマネジメントの実現を目的としている。参画14社は、リソースを統合的に制御するために必要なシステムの構築や、リソースの一括制御技術の確立による新たなエネルギーマネジメントの実現、それによるエネルギー利用の最適化や再生可能エネルギー電源のさらなる導入拡大を目指している。

具体的には、電力系統に点在する顧客の機器をIoT(Internet of Thing)化して一括制御し、顧客の設備から検出できる需給調整力を有効活用し、あたかも1つの発電所のように機能させる仕組みの構築を目指している。これにより、電力系統における需給調整力が増強され、再生可能エネルギー電源のさらなる導入も可能となる。

2) スマートレジリエンス・バーチャルパワープラント構築事業

横浜市は従来から横浜スマートシティプロジェクト(YSCP)実証事業や「横浜スマートビジネス協議会(YSBA)」において防災性、環境性、経済性に優れたエネルギー循環都市の実現に向けて取り組んでいた。また、2017年に目指している節電取引市場にも積極的に取り込

²²³関西VPPプロジェクト実証事業 http://www.kepco.co.jp/corporate/pr/2016/0728_3j.html

んでいる。同事業は地域防災拠点に指定されている横浜市内の小中学校（各区1校、全18校を予定）に、10kWhの蓄電池設備を設置し、東芝が開発した蓄電池群制御システムにより、平常時には電力需要の調整（デマンドレスポンス）のために東京電力 EP が活用、非常時には防災用電力として横浜市が使用する計画となっている²²⁴。

3) 蓄熱槽を含む多彩なエネルギーリソースを活用したバーチャルパワープラントの構築

同事業はアズビル株式会社を中心に地域冷暖房や業務用ビルの蓄熱槽を活用し、PV による系統への影響を抑制する技術の実証を行うこととなっている。また、複数建物による需要電力の平準化を実現する技術に関して、高度なエネルギーマネジメント技術の適用を実証する計画となっている。これらの実証を通じて、業務用ビル全般にわたり多彩なエネルギー・リソース・アグリゲーションによるネガワットの創出技術の開発とエネルギーリソースを供給力、調整力等として活用するビジネスモデルを構築することを目指している²²⁵。

4) バーチャルパワープラント構築を通じたリソースアグリゲーションビジネス実証事業

同事業は太陽光発電などの再エネ導入が急速に進み、再エネ出力の大きな変動や余剰電力の大量発生した結果、電力系統の安定運用に影響を及ぼす様々な課題が顕在化していることを背景に、電力系統を安定化させるための火力発電（調整電力）設備の保有・維持のコストを抑制しつつ、継続的な再エネ導入と電力系統安定化を実現するための実証事業となっている。

実証事業の概要として共同申請 9 社は社会に分散して存在するエネルギーリソース(蓄電池等のエネルギー設備やディマンドレスポンスなどの電力を消費する需要家側の取組みを含む)をメガワット級の調整電力にする VPP の構築となっている。また、将来的には、需要家が所有する蓄電池、給湯設備、電気自動車(EV)、太陽光発電等の多種多様なエネルギーリソースも VPP の一部を構成し、それらエネルギーリソースが束ねられて一つの大きな電力として社会で利用されるよう、VPP の拡張にも目指すこととなっている²²⁶。

5) IoT とビッグデータを活用した先駆的 VPP 実証事業

同事業はアグリゲーターを中心としたバーチャルパワープラントのサービススキームの検証を行うとともに、今後普及拡大が見込まれる太陽光発電と蓄電池の創蓄連携システムのアグリゲーション共通規格化、電気自動車をエネルギーリソースとして活用するためのシステム開発等を行うこととなっている²²⁷。

6) 壱岐島における再エネ出力制御回避 アグリゲーション実証事業

同事業は、長崎県壱岐島で 2016 年より需給バランスの調整のために再生可能エネルギー発電事業者に出力制御指令が発令されていたことを背景に、SB エナジーが、壱岐開発株式会社が運営する壱岐ソーラーパーク（出力規模：1,960kW）」の電力を対象に、出力制御指令によっ

²²⁴ <http://www.tepco.co.jp/ep/notice/pressrelease/2016/pdf/160706j0101.pdf>

²²⁵ http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/energy_resource/pdf/004_02_03.pdf

²²⁶ http://jpn.nec.com/press/201608/20160801_01.html

²²⁷ <http://www.eneres.co.jp/pr/20160729.html>

て抑制される予定の電力を、壱岐島内に点在する蓄電設備を利用して遠隔制御で新たな電力供給先を創出するアグリゲーションを行うこととなっている。電力供給先となる蓄電設備としては、既設の定置型蓄電設備のほか、日産自動車株式会社が「電気自動車（e-NV200）活用事例創発事業」で壱岐市役所へ3年間の無償貸与を行っている電気自動車（EV）、壱岐島内の一般家庭に設置する蓄電設備などを利用する計画となっている。

SB エナジーは蓄電設備の容量情報を基に、出力制御指令の前日には必要な蓄電量を確保するための遠隔制御指令を行い、出力制御実施当日は発電事業者向けに新たに確保した電力需要量に応じた出力制御指令をリアルタイムで発令して需要側コントロールによる需給バランス調整を行うことで、太陽光発電事業者の発電機会損失を回避し、太陽光発電設備の活用最大化と一連の事業のビジネスモデルを検証することとなっている²²⁸。

同事業に利用される制御ソフトウェアはSB エナジー社が開発したもので、通信セキュリティは通信会社ならではの高いレベルのものとなっている模様である。下図に示すように、従来九州電力社から太陽光パネルへの出力制御の指令はSB エナジー社が一旦受け取り、SB 社が構築した蓄電設備やエネルギー需要家等の状況に応じて太陽光パネルの発電を出力制御する仕組みとなっている。

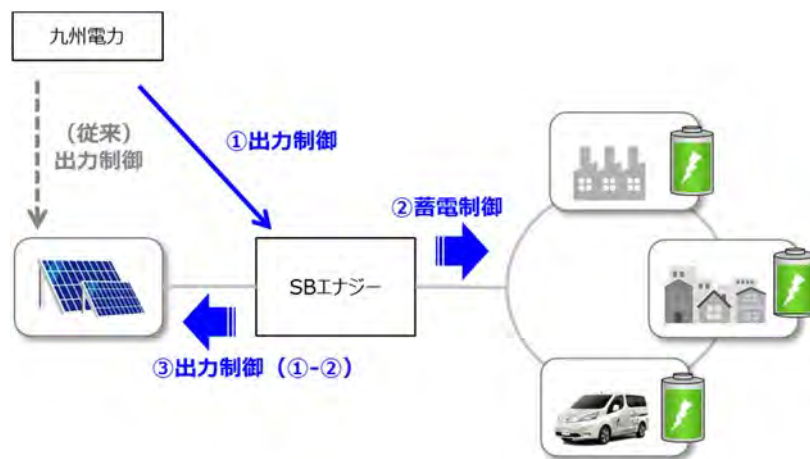


図 102 同事業における電源管理の仕組み

出所) SB エナジー社 HP (http://www.sbenergy.co.jp/ja/news/pdf/press_20160729_01.pdf)

表 55 参画事業者の役割

役割	事業者	内容
アグリゲーター	SBエナジー株式会社	送配電事業者からの出力制御要請を受け、需要家の蓄電設備活用状況から新たな需要の創出量を算出し、蓄電設備の提供者への遠隔制御指令、発電事業者への出力制御を指令
送配電事業者 (出力制御要請者)	九州電力株式会社	送配電事業者として出力制御を要請し、アグリゲーターへの出力制御指令を発令

²²⁸ https://www.sbenergy.co.jp/ja/news/pdf/press_20160729_01.pdf

需要家 (蓄電設備提供者)	壱岐島内需要家	定置型蓄電池や電気自動車(EV)の所有者・使用者として、アグリゲーターへ蓄電設備の空き容量とその情報を提供
発電事業者	壱岐開発株式会社	壱岐島内の太陽光発電事業者として、アグリゲーターからの新たな需要値に則した出力制御指令を受ける
協力会社	オムロン株式会社	小規模 PCS メーカー
	東芝三菱電機産業システム株式	大規模 PCS メーカー
	日産自動車株式会社	自動車メーカーとして電気自動車 (EV) を貸与

出所) SB エナジー社 HP (http://www.sbenergy.co.jp/ja/news/pdf/press_20160729_01.pdf)

10.7.3. 他国の主な研究開発動向

1) 米国の VPP の開始と動向²²⁹

米国では 2002 年 VPP 実証事業を開始した模様である。株式会社テクノリサーチ研究所が実施した平成 16 年度成果報告書「新エネルギーの貯蔵・輸送等による有効利用法の調査」によると、1999 年米国エネルギー省ボンネビル電力局 (Bonneville Power Administration : BPA) が提唱した「EnergyWeb—the original Smart Grid Concept」の概念に賛同した形で賛同企業がコンソーシアムを結成し、2002 年から VPP の各種の実証を行なったとされている。ちなみに、上記補助金事業の参画社である Comverge 社 (当時 6th Dimension 社) が VPP のプラットフォームを提供したことが報告されている²³⁰。

米国では、連邦政府と州政府の各種政策 (例えばカリフォルニアの RPS では 2020 年に 33%、30 年に 50%) の後押しで太陽光をはじめとして再生可能エネルギー発電が急速に拡大している。特に太陽光発電は、系統側の設置だけでなく、DER として 家庭や商業施設・工場など需要側に設置される傾向がある。そのため、正味需要 (Net load = 需要 - 太陽光等による発電量) は、従来型発電と異なり、昼間に減少、夕方に急増というロードカーブが現れた。この結果、火力の発電は昼間に供給過剰、夕方に供給不足となる懸念が出てきた。対策としては、電力需要を柔軟に変化させる DR の活用や、電力貯蔵設備の導入が検討されている。

欧州と同様に、電力市場の構造的な変化に対応するため、容量市場の構築に従って DR を含めた DERMS 技術を駆使した VPP 企業も成長している。カリフォルニアの独立系統運用者 CAISO は、DR、太陽光発電、電力貯蔵設備、電気自動車 (EV) といった DER の所有や運用を行う事業者「DER プロバイダー」が市場に参加できる制度の導入を進めている。

2) 欧州の VPP の開始と動向

欧州の VPP の開始は、2001 年に電力供給システムをより分散型かつ市場志向の構造へ移行

²²⁹ <https://www.itrco.jp/wordpress/2016/06/vpperab6/>

²³⁰ http://www.nikkei.com/article/DGXNASFK2800F_Y4A120C100000/

させることを目的に実施した IRED (Integration of Renewable Energy Sources and Distributed Generation into the European Electricity Grid) 研究開発プロジェクトの一つとして、Dispower (Distributed Generation with High Penetration of Renewable Energy Sources) プロジェクトが実施されたことがきっかけとなった模様である²³¹。

現在、電力市場の自由化が進む欧州で、VPP がビジネスモデルとして成長している。例えば、ドイツの NEXT KRAFTWERKE 社が FIT 料金と市場価格の差額分が補填される「マーケット・プレミアム」制度を活用して、1000 カ所を超える発電設備を束ねることに成功した。同社はドイツだけでなく欧州の電力容量市場に、傘下の複数の発電所の発電容量を束ねて参画している。²³²

²³¹ 同上

²³² http://www.nikkei.com/article/DGXNASFK2800F_Y4A120C1000000/

11. その他

11.1. 海洋エネルギー

11.1.1. 国内の技術開発動向

(1) 技術の概要

1) 波力発電

波力発電（Wave Power Generation）は波の力で発電機を回して電気を得る仕組みで、海岸に絶えず波が押し寄せる国には適している。すでに航路標識などの小規模なものは実用化されているが、さらに大規模な装置の実用化が欧米を中心に進められている。我が国でも、石油危機を背景に研究開発が始まり、海洋科学技術センター（現：独立行政法人海洋研究開発機構）などが、1998年7月から2002年3月までの約3年半の間、沖合浮体式波力装置「マイティホエール」の実験を行っていた。



図 103 我が国の波力発電装置の例（マイティホエール）

出典：海洋研究開発機構（JAMSTEC）

2) 潮流・海流発電

潮流発電（Tidal Current Power Generation）システムは、潮汐現象に伴う海水の流れのエネルギーを水車などにより回転エネルギーに変換して利用するものである。一般的には海底地形が狭まっているところ、流れの速い「瀬戸」や「海峡」と呼ばれるところなどに設置される。潮流は潮汐による流れのため、流れる向きが一日に約4回変わるため、その対処が必要である。

海流の流れを利用して水車などにより回転エネルギーに変換し、発電を行うのが海流発電（Marine Current Power Generation）である。海流は地球規模の流れで、年間を通じて流れる方向は一定である。近年では油田のリグ用に海洋建造物に対する技術進歩が進んでいることに加え、水力発電技術などの既に陸上で用いられている技術体系も利用できることなどから、潮流・海流発電の技術環境も整いつつあると言われている。



図 104 海流発電のイメージ

出典：MCT（Marine Current Turbines）社

3) 潮汐発電

潮汐発電（Tidal Power Generation）は、潮の干満のエネルギーを利用するものであり、沿岸部にダムを造り、満潮時にダムに海水を蓄え、干潮時にそれを放出して発電機の水車を回し発電を行う。フランスのランス川河口の潮汐発電所（24万kW）が世界で最初の潮汐発電所であり1966年に商用運転を開始した。2011年の8月に運開した韓国の始華湖潮汐発電所の発電容量は25.4万kWと世界最大である。

原理はダム式水力発電に類似していることから、新たな技術開発の余地は少ない。むしろ、潮の干満の差が大きい適地の特定・選定が重要であるが、ポテンシャルは少なく、我が国での導入実績はない。

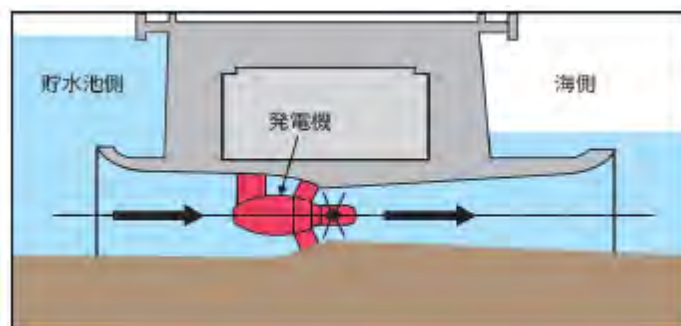


図 105 潮汐発電の原理

出典：NEDO 再生可能エネルギー技術白書

4) 海洋温度差発電

海洋温度差発電（Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC）は海面と海中の温度差を利用するものであり、海水の表面温度が高い赤道周辺が有利な地域となる。赤道周辺の海面近くの温度は25℃～30℃にもなるが、水深500m付近では数℃にまで下がり、水深1,500mになると1℃～4℃の範囲で安定する。この温度差を利用して、海面付近では気化し、深層部で液化する特殊なガスを使い、このガスを循環させて発電を行う。

我が国では、1990年代から佐賀大学が研究開発を行っている。また、近年では、沖縄県久米

島などにおいて実証試験が行われている。

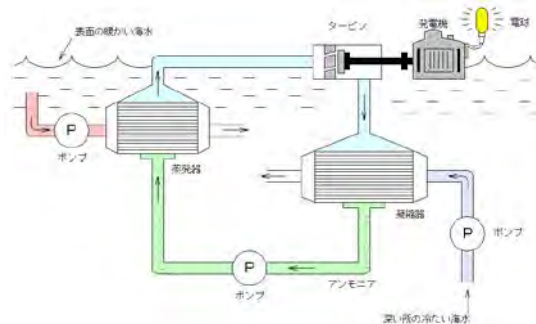


図 106 海洋温度差発電の原理

出典：佐賀大学海洋エネルギーセンター資料

(2) 近年の動向

波力発電や潮流発電は、石油危機を契機に研究開発が進められてきたが、石油価格の安定化とともに 2000 年代前半には研究開発が大幅に縮小した。しかし、近年の再生可能エネルギーへのニーズの高まりや海洋エネルギーの技術開発の活発化により、我が国では NEDO が中心となって研究開発を実施している。

現在の海洋エネルギーの研究開発の基本となるものは、海洋基本法に基づく「海洋基本計画」（2013 年 4 月閣議決定）であり、この中で、海洋再生可能エネルギーの利用促進として、波力、潮流、海流、海洋温度差を活用した発電技術の発電コスト目標を 40 円/kWh に設定し、革新的な技術シーズの育成、発電システムの開発、実証研究等を実施することとしている。

NEDO では、「海洋エネルギー技術研究開発」基本計画を策定して、技術研究開発を実施しており、2016 年度に発電コスト 40 円/kWh 以下、2020 年度に 20 円/kWh 以下を目標としている。

11.1.2. 主な国内企業

- 1) 波力発電
三井造船、三菱重工、東亜建設工業、日立造船等
- 2) 潮流・海流発電
川崎重工、三井海洋開発、IHI、五洋建設等
- 3) 海洋温度差発電
佐賀大学、神戸製鋼所等

11.1.3. 他国の主な研究開発動向

(1) 欧州

海域の波力・潮流エネルギー密度が高いイギリスを中心に研究開発が進められている。EU では、海洋エネルギー産業の戦略的目標を立てている。また、スコットランドの European Marine Energy Centre、イングランドの Narec、Wave Hub、ポルトガルの Wave Energy Centre などの実

証試験サイトで集中的に取り組まれている。

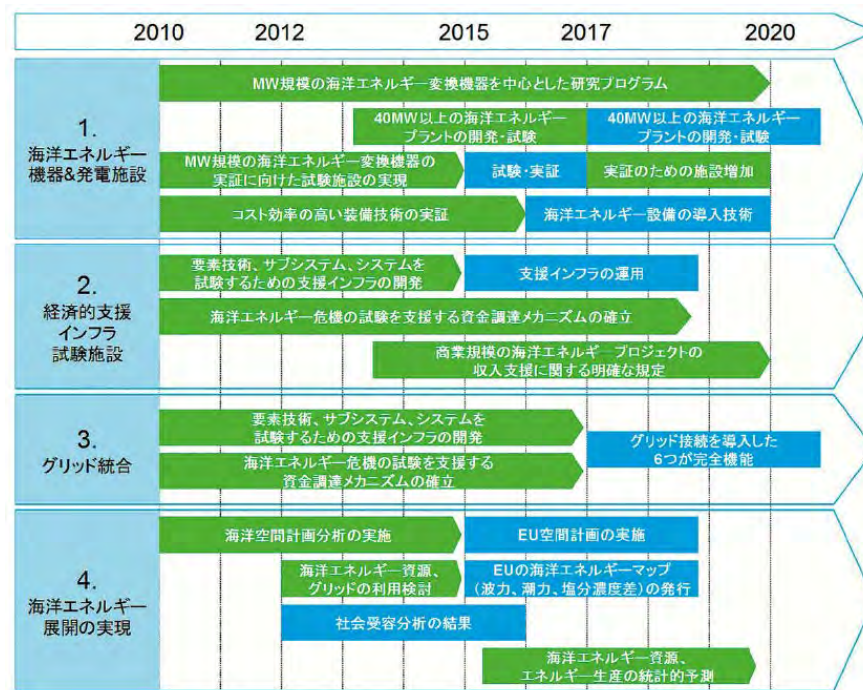


図 107 欧州イニシアティブの技術開発ロードマップ

出典： NEDO 再生可能エネルギー技術白書

代表的な企業を以下に示す。

1) 波力発電

Pelamis Wave Power 社、Aquamarine Power 社

2) 潮流発電

Open Hydro社、Hammerfest Strom社、Tidal Generation Limited社、Scotrenewables Marine Power社、Atlantis Resources 社、Voith Hydro社

(2) アメリカ

DOE が Water Power Program の中で海洋エネルギーの技術開発を行っている。また、産業団体である Ocean Renewable Energy Coalition (OREC) は 2011 年に、海洋エネルギーの技術ロードマップを作成し、2030 年までに 15GW の導入目標を設定し、技術別のアクションプランを策定している。

Phase I:	Demonstration and Pilot Projects (pre-commercial, grid connected)
	100 kW → 5 MW
Phase II:	Pilot Projects growing into Commercial Project Arrays
	5 MW → 50 MW
Phase III:	Small Arrays growing into Commercial Utility-Scale Arrays
	50 MW → 100 MW

図 108 米国 OREC の海洋エネルギー技術ロードマップ

出典： NEDO 再生可能エネルギー技術白書

11.2. 太陽熱発電

11.2.1. 国内の技術開発動向

(1) 技術の概要

太陽熱発電（Concentrated Solar Power）は、集光した熱を、熱機関（蒸気タービン等）を用いて電気に変換する技術である。日照条件に優れた米国の砂漠地帯、地中海沿岸、中東地域で導入されている。太陽光発電は日射のうち直達日射と散乱日射の両方を利用できるが、太陽熱発電は直達日射しか利用できない。そのため、年間を通じて晴天日が多く、空気が澄んでいる乾燥地域を中心に導入が進む。米国およびスペインなどでは商用発電設備も稼働している。集熱器には、パラボラ・トラフ型、パラボラ・ディッシュ型、タワー型などがある。

また、集熱した太陽エネルギーを熔融塩の相変化を利用して蓄熱することもできることから、太陽光の出力変動を制御することも可能でありベースロード電源としての期待も高まる。また、コンバインドサイクルとのハイブリッド型によってより安定的な電力供給を目指したシステム構成もある。

我が国では、1981年に香川県で1MWの実証試験が行われたが、上述のように我が国は、太陽熱発電の導入適地ではないため、その後実証試験は行われていない。

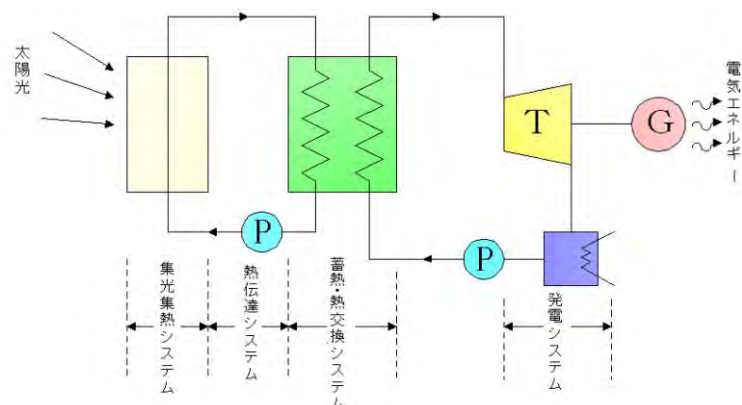


図 109 太陽熱発電の原理

出典： 経済産業省資源エネルギー庁監修「資源エネルギー年鑑（2005/2006）」

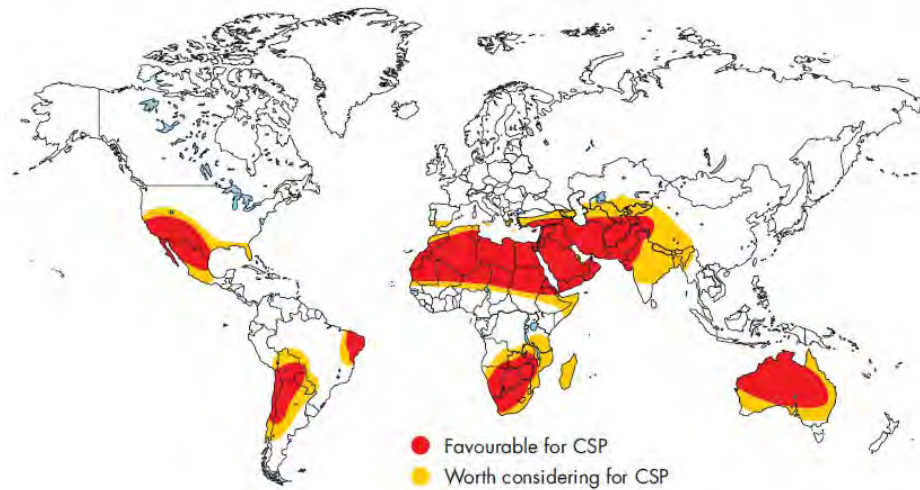


図 110 太陽熱発電の理想的な設置地域

出典： IEA “Energy Technology Perspectives 2008”

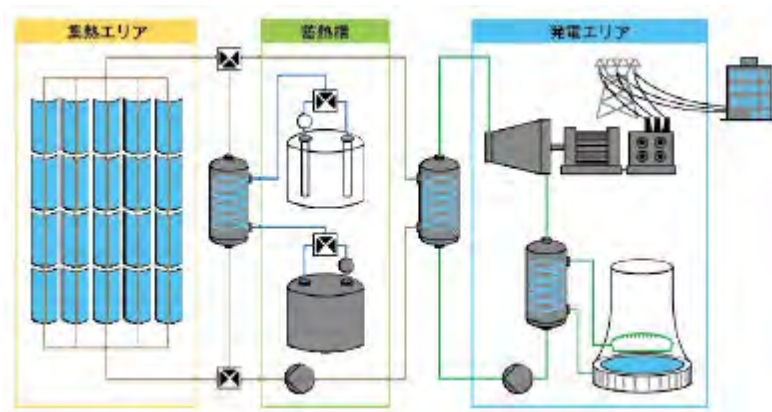


図 111 蓄熱システム型太陽熱発電

出典： NEDO 再生可能エネルギー技術白書

(2) 近年の動向

アブダビの Masdar で、東京工業大学の提案に基づき、三井造船がビームダウン式の太陽熱発電の試験プラントを建設した。JFE エンジニアリングは、タワー型レーザー技術の開発を行った。川崎重工は、ガスタービンコンバインドサイクルと太陽熱発電を組み合わせた太陽熱コンバインド発電（ISCC：Integrated Solar Combined Cycle）の開発に取り組んでいる。



図 112 ビームダウン式太陽熱発電

出典：NEDO 再生可能エネルギー技術白書

11.2.2. 主な国内企業

三井造船、JFE エンジニアリング、川崎重工、千代田化工

11.2.3. 他国の主な研究開発動向

主に、蓄熱システムの開発、低コスト化、運転費の削減などを目的に、スペインや米国の企業が開発に取り組んでいる。特に、集熱部分のコスト削減が重要視されている。以下に主要な企業を示す。

Abengoa Solar（スペイン：トラフ型、タワー型）

Acciona Energía（スペイン：トラフ型）

Areva Solar（フランス：フレネル型）

BrightSource（米国：タワー型）

eSolar（米国：タワー型）

Novatec Solar（ドイツ：フレネル型）

11.3. バイオマス発電

バイオマス発電は、従来型の技術を利用しており、新たな技術開発の余地は非常に限定的である。一方、低炭素化やバイオマス導入による設備費の増大を回避のために、既存の石炭火力発電にバイオマスを混入する石炭バイオマス混焼発電の導入が進められている。

石炭バイオマス混焼発電においては、木質バイオマスを石炭と混合した後に既設の微粉炭機で混合粉砕する方式と、バイオマス専用の粉砕設備を設置する二種類がある。前者の場合は、追加的な設備費を抑えられるが混合割合は数%程度にとどまる。一方、後者の場合は、混合割合を高めることができるが、追加的な設備費がかかる。

IRENA の”Renewabl Capacity Statistics 2016”によると、世界のバイオマス発電の設備容量は過去5年において年平均6GWで増加し、2015年の設備容量は104GWに達する。我が国では、2012年7月のFIT導入後導入が進み、2016年10月末時点における一般木質バイオマス発電の

設備認定量は、約 3.2GW で、うち 0.27GW が稼働開始している。ただし、国内バイオマス燃料は原料もさることながら輸送費も高いことから、多くのバイオマス発電事業者は、木質チップを主に東南アジアなどから輸入している。したがって、バイオマスの輸送に係るエネルギー消費を含めた総合エネルギー・二酸化炭素排出収支の評価が必要となる。

11.4. 水力・揚水

水力発電に関しても新たな技術開発の余地は少ない。ただし、大規模な水力発電が既に開発済みの地域においては、今後は中小規模の水力発電の導入が期待されるが、コストダウンが求められる。

一方で、途上国でも今後、太陽光発電や風力発電など出力変動型再生可能エネルギーの導入拡大が見込まれ、エネルギー貯蔵技術としての揚水発電の必要性が高まる可能性もある。通常の揚水発電は、一定の回転数で運転されるため揚水運転中は入力電力を変えることができないが、可変速揚水発電システムを利用すれば、入力電力を変動することができ、周波数調整が可能となる。したがって、出力変動型再生可能エネルギーの系統安定化対策として効果的に利用することができ、従来周波数調整の役割を担っていた火力発電を停止できたり不要になったりすることから、CO₂ 排出削減にも貢献できる。

可変速揚水発電設備の国内企業 東芝、日立、等

III. 先進的低炭素エネルギー技術の市場規模・競合他社分析

本章では、前章で取り上げた事項のうち、本調査にて特に焦点を当て、企業へのインタビューを行った技術として、太陽光発電、地熱発電、風力発電、高効率火力発電および蓄電池について、市場規模、本邦企業及び競合他社の展開状況について取り上げる。なお、概要について、取りまとめると以下のとおりとなる。

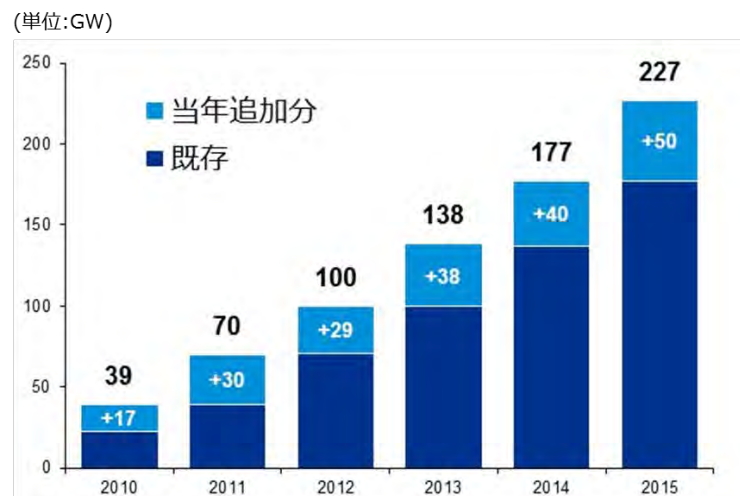
LGE技術の類型化	詳細項目	国内企業	競合相手	市場規模
太陽光	シリコン系、化合物系、有機系	三菱電機、シャープ、パナソニック、京セラ、ソーラーフロンティア、カネカ、ほか	中国: Yingli Green Energy, Trina Solar, Canadian Solar, Jinko Solar, ReneSola, JA Solar アメリカ: First Solar カナダ: Sun Power Corp 韓国: Hanwha Solar One	市場規模 2015年の世界の太陽光発電システムの累積導入量: 約227GW(世界の電力需要の約1.3%) (出所: Snapshot of Global PV Markets 2015 (IEA PVPS)) 結晶シリコン(2012年): 世界 9GW(うち日本企業 0.5GW) (出所: NEDO)
地熱	フラッシュ方式、バイナリー方式、EGS、超臨界地熱資源(マグマ)	三菱日立パワーシステムズ、東芝、富士電機、ほか	Ansaldo/Tosi, ORMAT, GE/Nuovo Pignone	世界の設備容量合計: 13.3GW(2015年)、2021年には18.4GWになると予想
陸上風力		三菱重工、日立製作所、東芝、日本製鋼所ほか	中国: Gold Wind デンマーク: Vestas アメリカ: GE ドイツ: Siemens	風力発電(陸上、洋上)累積導入量: 432.9GW(2015年) 内訳: アジア地域 175.8GW、欧州地域 147.8GW、北米地域 88.7GW 風力発電市場は中国が世界最大のマーケット
洋上風力	着床式、浮体式	三菱重工、日本製鋼所、東芝、日立製作所、ほか		洋上風力発電累積導入量: 12,107MW (2015年)
高効率火力	USC、A-USC、IGFC、IGCC、AHAT、GTCC、GTFC	三菱日立パワーシステムズ、東芝、IHI、富士電機、川崎重工	アメリカ: GE ドイツ: Siemens AG スイス: ABB	【天然ガス火力】 2040年で9,008TWhの発電電力量となる見通し (出所: World Energy Outlook 2015, IEA)
蓄電池(系統用)	鉛蓄電池、NAS電池、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池、(バナジウム)レドックスフロー電池、ナトリウムイオン電池	GSユアサ、日本ガイシ、パナソニック、川崎重工業、日立マクセル、NEC、東芝、住友電工	韓国:サムスンSDI、LG化学 中国: 比亞迪汽車(BYD)、BYK	市場規模 2012年度: 3.3兆円(リチウム電池 約1.7兆円) 2020年度: 6.5兆円(リチウム電池 約4.4兆円)

1. 太陽光発電

1.1 市場規模

国際エネルギー機関・太陽光発電システム研究協力プログラム（IEA PVPS）の報告書「Snapshot of Global PV Markets 2015」によると、2015年に世界の太陽光発電システムの累積導入量は、約227GWになり、太陽光発電は世界の電力需要の約1.3%を占めるようになった¹。

図 1：世界の太陽光発電導入量（累計）推移



出典：IEA-PVPS の資料を基に作成^{2 3}

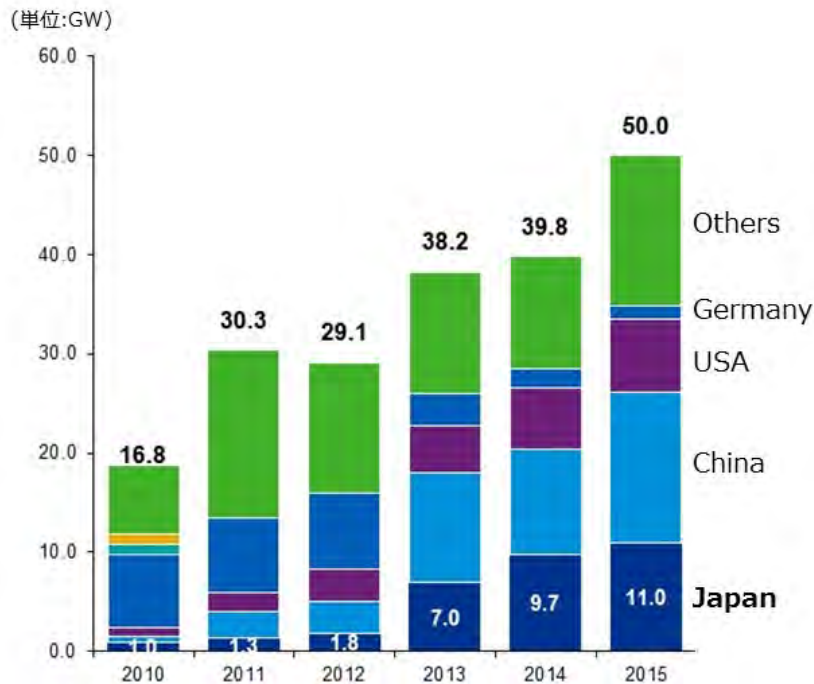
下図によると、世界各国での FIT 制度の導入等により世界全体での市場、特に中国、アメリカは成長している。FIT 制度などの普及で太陽光発電の導入が先行していたドイツでは、2012年6月末に再生可能エネルギー法を大幅に改定し、太陽光発電の買い取り価格を20~30%引き下げるなどの支援策の見直し・買取価格減額により、自国市場は縮小傾向にある。日本市場については、2012年7月の FIT 導入に伴い、急成長し、2015年世界市場で国別で第2位の市場シェアをもつ。

¹ IEA PVPS は、エネルギーにおける太陽光発電の貢献を分析するために設置・系統連系ベースで、太陽電池モジュールの容量（DC 容量）で導入量を報告している。

² IEA-PVPS, “TRENDS 2015 IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS” : http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/national/IEA-PVPS_-_Trends_2015_-_MedRes.pdf

³ IEA-PVPS, “2015 SNAPSHOT OF GLOBAL PHOTOVOLTAIC MARKETS” : http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2015_-_Final.pdf

図 2：世界の太陽光発電導入量の単年度推移



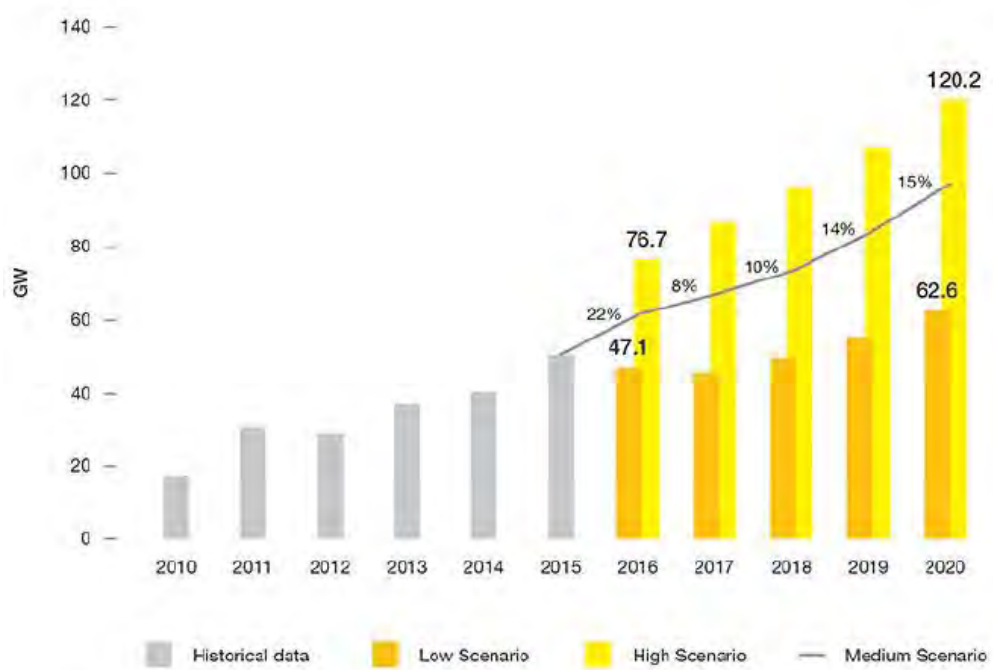
出典：IEA-PVPS の資料を基に作成^{4 5}

今後の導入量予測として、欧州の太陽光発電業界団体である SolarPower Europe によると、太陽電池モジュールの世界市場は、中国や米国の他、東南アジアやインド、アフリカ、オセアニアなどの地域でも太陽光発電システムの設置数が増加し、2020年の太陽電池モジュール世界市場（High Scenario ベース）は120.2GWに拡大すると予測している。

⁴ IEA-PVPS, “TRENDS 2015 IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS” : http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/national/IEA-PVPS_-_Trends_2015_-_MedRes.pdf

⁵ IEA-PVPS, “2015 SNAPSHOT OF GLOBAL PHOTOVOLTAIC MARKETS” : http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2015_-_Final.pdf

図 3：世界の太陽電池モジュール市場規模推移と予測（容量ベース）



出典：SolarPower Europe, “Global Market Outlook for Solar Power 2016-2020”⁶

⁶ <http://resources.solarbusinesshub.com/solar-industry-reports/item/global-market-outlook-for-solar-power-2016-2020>

中国の太陽光市場

国家統計局データによると、2014年の太陽電池生産量は前年比28.1%増の47,369MWとなった。太陽電池の価格は国外製品より約30%安く、太陽電池生産量の約7割が輸出向け、3割が国内新規導入向けの構造である。2006年頃から国内太陽電池の生産規模は急拡大し、2007年には中国が世界首位生産国となった。

外需に関しては、主要需要先のヨーロッパとアメリカが、近年、国内の補助政策を変更したり、中国製太陽電池に対する反ダンピング措置を発動したりしており、その影響から需要は著しく減少した。

一方、内需に関しては輸出型企業が中国内販路を積極的に開拓、同時に2009年頃からの「金太陽工程」などの補助金による育成政策実施が影響して、国内年間新規導入量は2009年の160MWから2013年の11,800MWに急増した。2011年、2012年、2013年の新規導入量はそれぞれ前年比5倍、2倍、3倍の増加を記録した。2013年の太陽光発電の累計導入量は2005年の266倍、18,600MWとなった。2013年の太陽光発電累計導入量19GWと第十三次五ヵ年計画における2020年110GW⁷の累積導入目標を考慮すると、中国の太陽光発電はまだ発展の初期段階にあると考えられる。

しかし、2012年には業界企業の設備稼働率は約5割（2007年は68%）であり、生産能力の過剰な状況が深刻になっている。その影響で、2012年から世界的な太陽電池の供給過剰により主原料であるシリコンの国際価格は大幅に下落し、太陽電池価格も対前年比で4割下落している。2013年からは、シリコン価格の下げ止まり、太陽電池メーカーによる価格設定などを含めた戦略の見直し、更には欧州で中国製太陽電池の価格統制が敷かれるなど、太陽電池価格が安定化する状況が整いつつあり、改善の兆しがみられる。

輸出入の動向を見ると、2013年は輸出価格の大幅な下落および外需低迷の影響により、中国の太陽電池輸出額は前年比21%減の102億ドルと低迷した。一方、輸入額は前年比46%増の19億ドルとなった。2013年の太陽電池輸出額の国内総生産額に占める割合は、7~8割とみられ、国内で生産されている太陽電池は主に外需向けであるといえる。

輸出額は、特に2006年頃から、国内太陽電池生産規模の急速な拡大により急増した。しかし、2011年の228億ドルをピークに、ヨーロッパやアメリカのエネルギー政策の変更により、2012年には著しく減少し、前年比44%減の128億ドルにまで縮小した。2013年は減少ペースが鈍化するものの、輸出額は2011年のピークに比べて約5割の水準にまで低下している。地域別では、2013年上半期時点で、中国からの輸出はヨーロッパや日本、カナダ、韓国向けが7割以上を占めている。

一方、輸入額は、近年10億ドルから20億ドルの間で変動し、2013年国内生産額の1割しかシェアを占めておらず、国外メーカー製品の輸入は需給バランスに対する影響度が薄いと見える。

⁷ 中国国家エネルギー局(NEA)、“第十三次5ヵ年計画(2016~2020年)”：
<http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/201612/P020161222570036010274.pdf>

1.2 太陽光設備のコンポーネント分類

太陽光設備を構成する機器について、一般的に以下に分類できる。通常、メーカーはこれらをパッケージ化して、製造販売している。






表 1：太陽光発電のコンポーネント

コンポーネント	内容
太陽電池モジュール	太陽光のエネルギーを受けて、太陽電池モジュールが直流電力を発電
接続箱	太陽電池モジュールで発電した電気をまとめて、パワーコンディショナに送るための装置
パワーコンディショナ	太陽電池モジュールで発電した直流電力を、施設で使える電気（交流電力）に変換する装置
分電盤	パワーコンディショナで変換された電気を、施設内の配線に分配
売電用／買電用メーター	売電用メーターは、施設で使い切れず電力会社へ売られた電力量を計測。買電用メーターは、夜間や雨の日などに電力会社から買った電力量を計測する装置
モニター	発電量や売電量、消費電力量等を手軽にチェックできる装置

出典：三菱電機ウェブサイト⁸

1.3 太陽電池モジュール市場の世界シェア

太陽光市場の拡大に伴い、太陽電池モジュール開発企業は数多く参入しており、その中で近年、中国企業が上位を占有、欧米や日系企業は影響度を落としている（下記参照）。中国メーカーの強みは価格競争力にあるが、供給過剰とモジュール価格の下落や需要先の欧米のアンチダンピング措置によって、経営環境は極めて厳しい。主なプレイヤーおよび世界シェアランキングについて下記のとおりである。

 中国 Yingli Green Energy、Trina Solar、Canadian Solar、Jinko Solar、ReneSola、JA Solar	 日本 京セラ、シャープ（Sharp Solar）、東芝、ソーラーフロンティア、三菱電機、パナソニック、カネカ、富士電機
 米国  カナダ First Solar SunPower Corp	 韓国 Hanwha SolarOne

出典：各社ウェブサイトを基に作成

⁸ 三菱電機，“太陽光発電のしくみ”：

<http://www.mitsubishielectric.co.jp/service/taiyo/jutaku/introduction/structure.html>

表 2：太陽電池モジュールの世界シェアランキング推移（供給量・出荷量）

順位	2011年	2012年	2013年	2014年
1位	Suntech Power Holdings Co. Ltd (中国)	Yingli Green Energy Holding Co., Ltd (中国)	Yingli Green Energy Holding Co., Ltd (中国)	Trina Solar Ltd (中国)
2位	First Solar, Inc. (米国)	First Solar, Inc. (米国)	Trina Solar Ltd (中国)	Yingli Green Energy Holding Co., Ltd (中国)
3位	Yingli Green Energy Holding Co., Ltd (中国)	Trina Solar Ltd (中国)	Sharp Corporation (日本)	Canadian Solar Inc. (中国)
4位	Trina Solar Ltd (中国)	Canadian Solar Inc. (中国)	Canadian Solar Inc. (中国)	Hanwha Q Cells Company Ltd (中国)
5位	Canadian Solar Inc. (中国)	Suntech Power Holdings Co. Ltd (中国)	JinkoSolar Holding Co., Ltd (中国)	JinkoSolar Holding Co., Ltd (中国)
6位	Sharp Corporation (日本)	Sharp Corporation (日本)	ReneSola Ltd (中国)	JA Solar Holdings Co., Ltd (中国)
7位	JinkoSolar Holding Co., Ltd (中国)	JinkoSolar Holding Co., Ltd (中国)	First Solar, Inc. (米国)	Sharp Corporation (日本)
8位	SunPower Corporation (米国)	SunPower Corporation (米国)	Hanwha Q Cells Company Ltd (中国)	ReneSola Ltd (中国)
9位	Hanwha Q Cells Company Ltd (中国)	REC Solar Inc. (ノルウェー)	Kyocera Corporation (日本)	First Solar, Inc. (米国)
10位	Kyocera Corporation (日本)	Hanwha Q Cells Company Ltd (中国)	JA Solar Holdings Co., Ltd (中国)	Kyocera Corporation (日本)

出典：2011年はIMS、2012年はIHS、2013年はNPD Solarbuzz、2014年はHISの調査結果⁹

⁹ 太陽光発電総合情報：http://standard-project.net/solar/maker/

1.4 個別企業

1.4.1 インリー・グリーン・エナジー

(1) 基本情報

商号	Yingli Green Energy Holding Co., Ltd (英利綠色能源控股有限公司、インリー・グリーン・エナジー)
本社所在地	No. 3399 Chaoyang North Street Baoding China (Corporate)
上場年月 (上場証券取引所)	2007年6月 (ニューヨーク証券取引所)
売上高	10億 CNY (2015/12期 連結)
総資産	176億 CNY (2015/12期 連結)
従業員数	14,533人 (2015/12期 連結)
代表者	Liansheng Miao (2015 -, Chief Executive Officer)
沿革	1998年: 現会長兼最高経営責任者の Liansheng Miao (苗連生) によって設立、太陽光発電事業に参入

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDA より作成

(2) 事業の概要¹⁰

中国の河北省保定 (Baoding) 市に本社を置く太陽電池大手メーカーである。インゴットからウェハ、モジュール、システムを一貫生産する設備を有する世界で一番大きい垂直統合型太陽電池メーカーとして知られており、2007年6月にニューヨーク証券取引所に上場した。

同社の年間太陽電池生産能力は2,450MWと世界トップレベルで、2013年には年間出荷量が3GWを超え、2012年と2013年の年間出荷量において世界で1位、2014年には2位の座に着いている。

同社の太陽電池の生産拠点は、本社の保定市を含め海南 (Hainan)、天津 (Tianshin)、衡水 (Shungshui) の4か所にある。本社工場では、インゴットからモジュール、システムまでの一貫生産する設備とともに太陽電池システムの周辺機器の生産設備を揃えている。多結晶シリコン太陽電池の生産をメインにしているが、2010年から2011年にかけて600MWのN字単結晶シリコン太陽電池をインゴットからモジュールまで一貫生産できる設備を構築し、同グループの生産拠点の中で最も大きい生産能力を有す。

海南の工場 (海南英利新能源有限公司) は、本社の保定市以外の生産拠点の中では一番大きい多結晶シリコン太陽電池生産拠点である。2011年3月、天津ハイテク区の Binhai Technology Park に建設された天津工場 (天津英利新能源有限公司) は、2012年から多結晶シリコン太陽電池生産工場としてスタートした。同工場も、インゴット casting、ウェハ加工、太陽電池製造、モジュール組立まで一貫生産できる設備体制を整えており、年間生産能力は300MWとなっている。

¹⁰ インリー・グリーン・エナジー ウェブサイトおよびプレスリリース : <http://www.yinglisolar.com/us/>

る。

衡水製造工場（Hengshui Yingli New Energy Resources Co., Ltd.）は、中国河北省の衡水経済開発区に2011年に設立された単結晶シリコン太陽電池生産工場である。年間生産能力は150MWで、インゴット鋳造およびウェハ加工、太陽電池製造およびモジュール組立まで対応する。

同社の「インリーソーラー」モジュールは、ドイツ、スペイン、イタリア、ギリシャ、フランスなどの欧州、韓国、中国、日本、オーストラリアおよびアジアの新興国、米国、南米市場に至るまで世界各地で販売されている。

太陽光発電事業関連子会社

日本：インリー・グリーン・エナジー・ジャパン株式会社

中国7社、スペイン、イタリア、ギリシャ、ドイツ、フランス、アメリカ、ブラジル

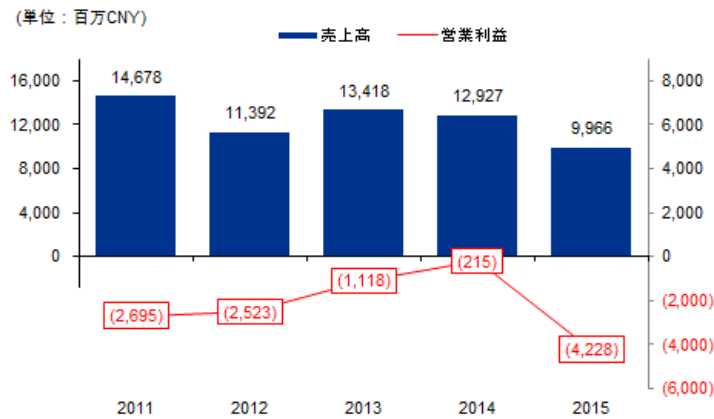
(3) 事業の財務概況

太陽電池市場は技術が成熟化して市場の参入障壁が下がってくると市場環境が大きく変化し、2000年ごろから中国系メーカーが多数参入し、果敢な投資によりシェアを伸ばした。そして2008年以降、リーマンショックやユーロ危機で日本や欧米メーカーの動きが鈍ると、ここでさらなる投資を重ねたことで中国勢が太陽電池の市場を一気に席巻して6割以上のシェアを握るようになった。同社もこのような動きの中で、急速にシェアを伸ばした会社である。設立は1998年であるが、2006年以降設備投資を加速することで急速に成長してきた。

太陽電池市場は参入障壁が低いので競争が激しく、1製品当たりの利幅が小さくなる。そこで、メーカーとしては投資をして生産を拡大し売上を増やすことで、利益を上げようとする。しかし、どのメーカーも同じように考えて投資をすることで業界全体としては過剰供給構造が生じ、結果として、ますます価格競争が激化して採算が悪化するという結果を招く¹¹。

¹¹ スマートエネルギー情報局：<http://jbpress.ismedia.jp/articles/-/44453>

図 4：インリー・グリーン・エナジーの売上高・営業利益の推移



出典：インリー・グリーン・エナジー，“Annual Report”¹²を基に作成

同社も上記市場環境に下、「インリーソーラー」のブランドで、廉価版の太陽光パネルを、ドイツ、スペイン、イタリア、ギリシャ、フランス、韓国、中国、日本、オーストラリア、米国などの市場で販売しているが、パネルメーカー同紙の競争激化で、収益を上げられない状況が続いている。財務状況を改善するために、同社は欧州法人で人員削減を行ったり、中国子会社のファインシリコンが保有し現在は遊休資産となっている不動産を処分したりする等を実施している。

1.4.2. トリナ・ソーラー

(1) 基本情報

商号	Trina Solar Ltd (天合光能有限公司、トリナ・ソーラー)
本社所在地	No. 2 Tian He Road Trina Pv Industrial Park New District Changzhou, Jiangsu China (Corporate)
上場年月 (上場証券取引所)	2006年12月 (ニューヨーク証券取引所)
売上高	30億CNY (2015/12期 連結)
総資産	47億CNY (2015/12期 連結)
従業員数	13,556人 (2015/12期 連結)
代表者	Jifan Gao (Chief Executive Officer)
沿革	1997年: 太陽光システムインテグレーターとして設立

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDA より作成

(2) 事業の概要¹³

太陽電池生産メーカーとして、2014年には、年間3.66GWのモジュールを出荷し、インリー・グリーン・エナジーを追い越して世界最大の太陽電池生産メーカーになった。

¹² <http://ir.yinglisolar.com/phoenix.zhtml?c=213018&p=irol-reportsannual>

¹³ トリナ・ソーラー ウェブサイトおよびプレスリリース：<http://www.trinasolar.com/>

同社は、2004年から太陽電池の生産を開始し、現在ではインゴットからセル、モジュール、システムに至るまでの結晶シリコン系太陽電池システムを一貫生産できる体制を整えている。単結晶シリコン系太陽電池モジュールは、出力210W～215W、270W～275Wなどのレベルの製品を販売しており、多結晶シリコン太陽電池においては出力300W～315Wなどの製品を用意している。また事業体制として、太陽電池を生産する製造事業部門と太陽光発電プロジェクト事業部門に分けられる。川上の太陽光発電モジュールの原料となるインゴットやウェハ、セルの生産からモジュールの生産と販売（輸出含む）などが製造事業部門に該当する。この他、EPCとして太陽光発電システムソリューションをサポートする川下のビジネスを行っており、同ビジネス内容が太陽光発電プロジェクト事業に該当する。同社は2009年以降から太陽光発電事業にも進出し、野立てメガソーラーなどの大規模太陽光発電所の建設や集合住宅や商業施設などのミドル層の太陽光発電システムの設置プロジェクトを遂行するビジネスも展開している。

本社は、中国江蘇省（Jiangsu）の常州市（Changzhou）にあり、中国内では営業拠点として北京と上海に支社を置いている。ヨーロッパにイタリア、イギリス、ドイツ、スペイン、スイスなどに支社を置いている。ヨーロッパの本社はスイスのチューリッヒである。北米にはカナダと米国のカリフォルニア州サンノゼに支社を置いている。中国を除くアジア太平洋地域・中東・アフリカ地域の総括本部はシンガポールにある。

世界6か所に生産設備を設けており、2015年6月基準、同社の年間生産能力は、インゴット2,300MW、ウェハ1,800MW、セル3,200MW、モジュール4,400MWとなっている。今後、中国国内や海外での需要が拡大するものと予測しており、370百万ドルを投資し、2015年末にはインゴット2,900MW、ウェハ2,300MW、セル4,100MW、モジュール4,400MWまで生産能力を拡大させる計画である。中国国内においては、本社のある江蘇省（Jiangsu）、常州工場のほか、同じ江蘇州内の塩城市（Yancheng）と湖北省（Hubei）仙桃市（Xiantao）、烏魯木省（Urumsuqi）新疆（Xinjiang）など4か所に工場を設けている。

同社は2014年から今後拡大する海外市場を攻略するため、中国以外での太陽光発電システム生産拠点の建設地を検討しており、まず、タイにセル700MW、モジュール500MWを生産できる施設が設けられることになり、2016年から本格的に稼働している¹⁴。またマレーシアにおいても工場の建設を検討した¹⁵が、マレーシア政府の反対により同国における設備投資は延期された。

(3) 事業の財務概況

2015年度中のモジュール総出荷量は5.74GWで、その内訳は、社外への出荷4.83GWおよび自社内の下流部門の電力プロジェクトへの出荷912MWで、前年度の3.66GWから56.8%増加した。これは、中国、日本および米国からの堅調な需要が主な推進力となった。

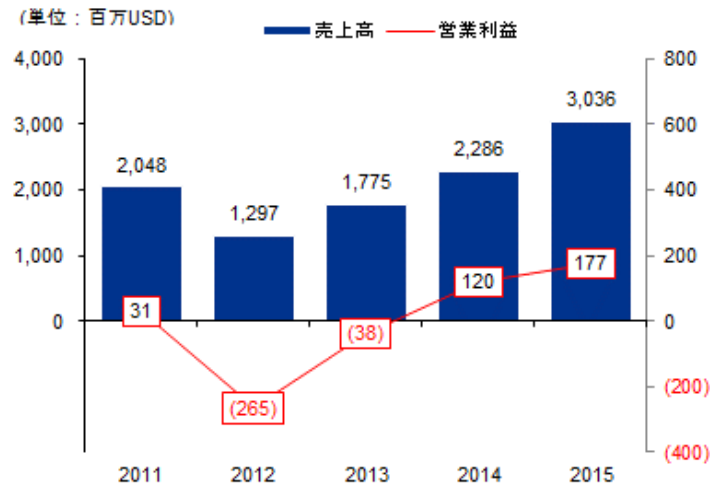
¹⁴ トリナ・ソーラー プレスリリース :

<http://www.trinasolar.com/us/news/trina-solar-launches-operations-thailand-manufacturing-facility-and-signs-us143-million>

¹⁵ トリナ・ソーラー プレスリリース :

<http://ir.trinasolar.com/phoenix.zhtml?c=206405&p=irol-newsArticle&ID=2065113>

図 5：トリナ・ソーラーの売上高・営業利益の推移



出典：トリナ・ソーラー, “Annual Report 2015”¹⁶を基に作成

2015年度の売上高は30.3億ドルで、これには、太陽光発電プロジェクトによる発電からの下流部門収入、プロジェクト売上高およびその他の1.7億ドルが含まれている。売上高は、前年度の22.9億ドルから32.8%増加した。営業利益は1.8億ドルで、前年度は1.2億ドルであった。営業利益率は5.8%で、前年度は5.3%であった。2015年度の利益率向上の主な要因は、モジュールの平均販売価格の全般的な下落幅を上回る製造コストの削減を実現したことに加えて、モジュール販売よりも高い利益率を生み出す海外下流部門の太陽光プロジェクトおよびEPCサービスの売上高が伸びたことであった¹⁷。

1.4.3. シャープ

(1) 基本情報

商号	シャープ株式会社（英訳名：Sharp Corporation）
本社所在地	大阪府堺市堺区匠町1番地
上場年月（上場証券取引所）	1949年5月（東京証券取引所）
売上高	2.5兆JPY（2016/3期 連結）
総資産	1.6兆JPY（2016/3期 連結）
従業員数	43,511人（2016/3期 連結）, 14,544人（2016/3期 単体）
代表者	戴正呉（2016-取締役社長）
沿革	1912年：早川徳次創業者が東京に金属加工業を創業 1924年：前年の関東大震災により全工場を焼失。早川兄弟商會を解散。大阪で再起を図る。大阪府東成郡田辺町

¹⁶ <http://ir.yinglisolar.com/phoenix.zhtml?c=213018&p=irol-reportsannual>

¹⁷ トリナ・ソーラープレスリリース：

<http://ir.trinasolar.com/phoenix.zhtml?c=206405&p=irol-newsArticle&ID=2145494>

	<p>(現・本社所在地)に早川金属工業研究所を設立</p> <p>1935年：株式会社早川金属工業研究所を設立、法人組織となる。資本金30万円</p> <p>1959年：太陽電池の研究開発を開始</p> <p>1964年：世界初のオールトランジスタ電卓“コンペット”〈CS-10A〉を発売し、総合エレクトロニクスメーカーの基礎を築く。太陽電池量産ラインを設置</p> <p>1970年：シャープ株式会社に社名変更</p> <p>2000年：太陽電池生産量世界1位となる。2006年まで7年連続世界</p> <p>2016年：鴻海精密工業股份有限公司との戦略的提携を発表。鴻海精密工業股份有限公司他3社を割当先とする第三者割当による約3,888億円の新株式を発行</p>
--	--

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDAより作成

(2) 事業の概要¹⁸

シャープは1959年から太陽電池の研究開発に着手した。1963年に電力用太陽電池の量産に成功。1967年から宇宙用太陽電池の開発をはじめ、灯台や人工衛星に同社の太陽電池が採用された。太陽光電池付き電卓の商用化と1994年の住宅用太陽光発電システム「サンビスタ(SUNVISTA)」の商用化で民生用でのシェアを拡大し、2000年には世界一の太陽電池生産企業になった。

電力用太陽電池としては単結晶シリコン太陽電池を使用していたが、1995年以降から多結晶シリコン電池の量産を開始し、産業向けの太陽電池のコストダウンを実現している。1998年からは薄膜シリコン太陽電池の量産を開始し、2011年3月からは堺太陽電池工場において受光面に電極のないバックコンタクト構造の新型高効率単結晶シリコン太陽電池「BLACK SOLAR」の量産を開始している。

同社の国内の生産拠点は、本来、葛城工場と堺工場の2か所で、葛城工場で結晶シリコン系太陽電池を、グリーンフロント堺工場では薄膜シリコン太陽電池と高効率の単結晶シリコン太陽電池「BLACK SOLAR」を生産していた。現在、国内生産拠点は堺工場の1か所に集約されている。

シャープの海外太陽電池生産拠点も整理されている。同社は、イタリア、英国、米国に太陽電池の生産拠点を設けていたが、2014年にイタリアの電力大手エネル(ENEI.MI)などと共同出資していた薄膜太陽電池生産工場の合併を解消した。

2004年から太陽電池の生産を行っていたイギリス・ウェールズのレクセム工場においても2014年2月に太陽電池の生産を中止している。北米の太陽光発電開発の子会社「リカレント・エナジー(Recurrent Energy)」(カリフォルニア州)においては2015年2月、Canadian

¹⁸ シャープ ウェブサイトおよびプレスリリース：<http://www.sharp.co.jp/>

Solar に約 304 億円（2 億 6,500 万ドル）で売却した¹⁹。生産拠点の縮小に伴い、同社では、住宅・産業用の結晶シリコン系太陽電池の需要においては中国など海外からの調達を拡大している。

太陽電池生産を縮小する一方で、メガソーラーの O&M 事業が拡大している。シャープは、2012 年国内の FIT 導入により、芙蓉総合リース株式会社と合弁でメガソーラー発電事業会社「合同会社クリスタル・クリア・ソーラー」を設立した。

タイにおいても、2011 年 3 月に大規模太陽光発電所の保守・メンテナンスサービスを提供するシャープ・ソーラー・メンテナンス・アジア（Sharp Solar Maintenance Asia Co.,Ltd.、SSMA）社を設立している。同社は、タイの大手発電事業会社 NED から世界最大級の 73MW の大規模太陽光発電所の保守・メンテナンス業務を受託したことを皮切りに、タイを含め、今後市場拡大が期待されるアジア地域でのメガソーラー O&M 案件に対応している。

また、タイにてこれまで約 140MW の発電所（Natural Energy Development 社 73.2MW と 10.3MW、Serm Sang Palang Ngan 社の 52MW）を EPC 事業者として建設する等、EPC から O&M まで一貫したサービス事業の拡大を目指している。

シャープの太陽光発電事業はエネルギーソリューションカンパニー傘下に置かれている。同社は、業務改善のため、この数年構造改革を積極的に進めており、プロダクトビジネスの 4 つの事業部門とデバイスビジネス傘下の 2 つの合計 6 つ事業部門を、2015 年 10 月から 5 つのカンパニー制に切り替えた。結晶シリコン系太陽電池、薄膜太陽電池、蓄電池を含むエネルギーソリューション事業部門は、「エネルギーソリューションカンパニー」として引き継がれている。エネルギーソリューションカンパニーの今後の事業方針として、国内産業用太陽電池の需要が低迷する中、国内では太陽電池と蓄電池をベースに HEMS、省エネ家電などをクラウドでつないだトータルソリューション事業を展開していく。

さらに、2016 年に鴻海精密工業股份有限公司との戦略的提携を機に同年 8 月に組織変更を行い、エネルギーソリューションカンパニーは「エネルギーソリューション事業本部」として新たなスタートを切っている²⁰。

また、海外でも、地域ごとのニーズに合わせたソリューションを展開している。アジアでは、「EPC 事業」やディーゼル発電機を組み合わせた「PV ディーゼルハイブリッド」、米州では、ピーク時の電力消費を減らして電気代を抑制する「ピークカットシステム」、欧州では、太陽熱を活用する「PV サーマルシステム」の展開を強化する方針である²¹。

中国やインド、東南アジア、米国など拡大する海外需要を攻略し、2017 年度には太陽光発電事業の海外売上比率を現在の約 10% から約 30% 水準に引き上げる計画である。特に太陽光発電システムの販売のみならず、ソリューション事業の比率を現在の 15～17% から 50% に拡大することを目指している²²。

¹⁹ シャープ プレスリリース : <http://www.sharp.co.jp/corporate/ir/pdf/2015/150203-3.pdf>

²⁰ シャープ プレスリリース : <http://www.sharp.co.jp/corporate/news/160826-a.pdf>

²¹ シャープ, “アニュアルレポート 2015” :

http://www.sharp.co.jp/corporate/ir/library/annual/pdf/2015/annual_2015.pdf

²² シャープ, “2015～2017 年度 中期経営計画” :

http://www.sharp.co.jp/corporate/ir/event/policy_meeting/pdf/shar150514_1_nt.pdf

さらに、生産コストの削減のため、海外から調達する資材のサプライチェーンの見直しや販路の集約・強化によって価格競争が激化している太陽光発電システムの生産コストの削減に取り組んでいく。また、シリコンの薄膜化にも拍車をかけ、原料（シリコン）調達価格への負担を軽減し、製造コストの削減を実現する。

(3) 事業の財務概況

太陽電池事業の業績は、国内首位プレイヤーであるにも関わらず、営業赤字に苦しんでいる。2013年度は国内市場において住宅用やメガソーラー等の産業用が好調であったことに加え、海外ディベロッパー事業が好調で、大幅に売上高を伸ばし営業黒字にも転換した。

しかし2014年業績は、セグメント売上高が前年度比38%減の2,708億円で、セグメント利益は前年の324億円から626億円の赤字に転落した。太陽電池の販売量減少と原材料であるポリシリコンの評価引当金計上が影響した。

(事例) 途上国への展開²³

シャープおよび重光商事株式会社は、モンゴル国の現地企業「Solar Power International LLC」と、3社共同で同国初となる太陽光発電所（メガソーラー）事業に参画する。2016年7月19日、3社間の契約合意に至り、着工開始し、2016年12月に商業運転を開始する予定。

本事業は、環境省が実施する二国間クレジット制度に基づく設備補助事業の採択を受けて推進している。シャープの太陽光発電に関する技術やノウハウをモンゴル国へ導入することで、エネルギー源を主として石炭に依存する同国にクリーンなエネルギーを供給し、温室効果ガス排出量の削減に寄与する。本発電所に設置する太陽電池モジュールの容量は10MW、年間予測発電量は約14,182MWh/年となり、約14,746tCO₂/年の温室効果ガス排出量削減に貢献する見込み。

シャープは、太陽電池モジュールや架台、インバーターなどの周辺機器の供給に加え、発電所の設計やエンジニアリング（EPC事業）を行う。重光商事は、日本での太陽光発電所運営のノウハウを活かし、本発電所の共同事業経営を今後25年にわたり支援する。

発電所の概要

所在地	モンゴル国ダルハン市
敷地面積	約291,000m ²
出力規模（モジュール容量）	10MW
年間予測発電量	約14,182MWh/年
想定温室効果ガス排出削減量	約14,746tCO ₂ /年
運転開始予定	2016年12月

²³ シャープ プレスリリース”モンゴル国初の太陽光発電所（メガソーラー）事業に参画”：
<http://www.sharp.co.jp/corporate/news/160719-a.html>

1.4.4. 京セラ

(1) 基本情報

商号	京セラ株式会社（英訳名：Kyocera Corporation）
本社所在地	京都市伏見区竹田鳥羽殿町6番地
上場年月（上場証券取引所）	1949年5月（東京証券取引所）
売上高	1.5兆JPY（2016/3期 連結）
総資産	3.1兆JPY（2016/3期 連結）
従業員数	70,567人（2016/9期 連結）, 14,146人（2016/3期 単体）
代表者	山口 悟郎（2013 - 取締役社長）
沿革	1959年：京都市中京区西ノ京原町101番地に本社並びに工場を4月1日付で設立 1982年：世界に先駆けて、多結晶シリコン太陽電池の量産化に成功。 1993年：日本で初めて住宅用太陽光発電システムの販売を開始

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDA より作成

(2) 事業の概要²⁴

1975年からシリコンリボン結晶太陽電池の開発に着手した。同社は、1982年から主力製品である多結晶シリコン太陽電池の研究開発をはじめ、量産を開始した。同社は、1993年に国内で初めて住宅用太陽光発電システム販売を開始した企業として、1997年には太陽光発電システムメーカーの中ではいち早く10年の製品保証制度を取り入れるなど国内の太陽光発電システム市場をリードしてきた。

京セラは、シリコンインゴットからセル、モジュールまですべてを自社で一貫生産する数少ない太陽電池メーカーの一つである。京セラで生産するセルは、多結晶シリコンが100%を占めており、プラズマエッチングを使って μm （マイクロメートル：0.001ミリメートル、1000ナノメートル）単位で光閉じ込めを施した独自のテクスチャ形成技術でセル表面に微細な凹凸をつくり反射ロスを抑える「d.Blue」技術を適用し、セル変換効率17.8%を達成している。また、「低反射ガラス」の採用で、発電に寄与せず反射してしまう日光の量を減らし、多結晶シリコンの発電性能を向上させている。

²⁴京セラ ウェブサイトおよびプレスリリース：<http://www.kyocera.co.jp/>

京セラの多結晶シリコン太陽電池セルは、2011年末にプラスとマイナスの再結合を防ぐといった新技術によって飛躍的な変換効率の工場を実現し、2011年12月時点で多結晶シリコン太陽電池セルにおいては世界一の17.8%という記録を達成した。「Gyna (ガイナ)」というブランド名がつけられている同社の多結晶シリコンセルは、2014年に変換効率18.6%となり、記録を更新している²⁵。

長年高品質でコストパフォーマンスのよい多結晶シリコン太陽電池製造にこだわりをもっていた京セラであるが、より高効率の太陽光発電システムへ高い需要を示している国内住宅用市場を攻略するため、2014年から製品ラインナップに単結晶セルを採用したモジュールを追加した。単結晶ウェハ(6インチ)は海外から輸入し、セルとモジュールを自社で生産している。

京セラの太陽光発電システムは、京セラで製造し、主に同社の子会社である総販売元の(株)京セラソーラーコーポレーションおよび全国販売窓口を介して販売されている。特に、同社の太陽光発電システム販売量の7割を占める公共・産業用の太陽光発電システムにおいては、京セラコミュニケーションシステム(株)が2012年からシステムの設計や施工、O&Mを提供する環境エネルギーエンジニアリング部を構築し事業を推進している。また、太陽光発電による売電事業においては2012年8月に東京センチュリーリースと共同で、「京セラTCLソーラー」を設立し、同社のシステムを提供すると共に、メガソーラーの売電事業も行っている。

国内における生産設備は、滋賀八日市工場(滋賀県近江市)、滋賀野洲工場(滋賀県野洲市)、三重伊勢工場(三重県伊勢市)がある。滋賀八日市工場と滋賀野洲工場ではセルを、三重伊勢工場ではモジュールを生産している。海外では、中国の天津、米国のサンディエゴ、ヨーロッパのチェコにモジュール生産拠点²⁶を構えている。国内と海外の生産拠点における生産能力は1GW超である。

太陽光発電関連傘下企業

京セラコミュニケーションシステム(株)：2012年太陽光事業開始

(株)京セラソーラーコーポレーション：1996年設立

京セラTLCソーラー合同会社：2012年設立

中国 Kyocera (Tianjin) Solar Energy Co.,Ltd.：2003年設立

香港 Kyocera Asia Pacific Pte. Ltd.：1977年設立

米国 Kyocera Solar Inc.：2010年工場稼働

EU Kyocera Solar Europe S.R.O.：2005年設立

中国 Kyocera Solar (China) Sales & Trading (京セラ中国商貿有限公司)

※持分法適用子会社、持分法適用関連会社除き

(3) 事業の財務概況

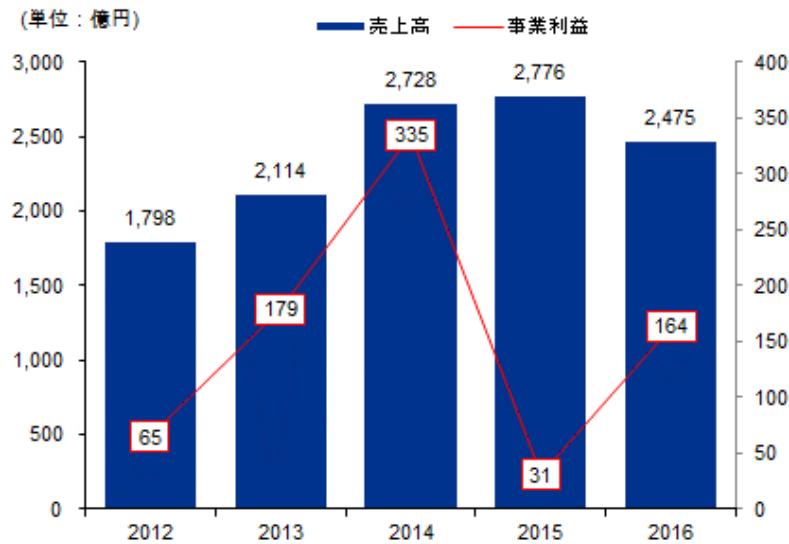
京セラの事業セグメントは、「ファインセラミック部品関連事業」、「半導体部品関連事業」、「ファインセラミック応用品関連事業」、「電子デバイス関連事業」、「通信機器関連事業」、「情

²⁵ 京セラ ウェブサイト：<http://www.kyocera.co.jp/solar/pvh/features/4quality/>

²⁶ 京セラ プレスリリース：http://www.kyocera.co.jp/news/2011/0106_famv.html

報機器関連事業」、「その他の事業」の7つで構成されている。公共産業用や住宅用に単結晶/多結晶シリコン太陽電池モジュールや太陽光発電システム等の開発・製造・販売については「ファインセラミック応用品関連事業」に含まれている。

図 6：「ファインセラミック応用品関連事業」の売上高・事業利益の推移



出典：京セラウェブサイト IR 資料室のデータ集²⁷を基に作成

2012年度は、欧州市場の成長鈍化による世界的な製品価格下落を主因に対前年で減収減益となった。2013年度は、さらなる競争激化により製品価格の下落が続いたものの、国内向け需要の大幅拡大により、全世界の販売量も前年度比で約50%の増加となった。また2014年度は、為替の円安により海外からの原材料調達コストが増加したが、国内の公共・産業用のソーラーエネルギー事業の増収や原価低減努力などを背景に、営業利益は前年度比87%増の大幅増益となった。しかし2015年度は、ソーラーエネルギー事業において引き続き製品価格が低下しているため、たな卸資産の評価損失が発生したほか、主力の国内においても売上が減少した。直近2016年度も、対前年比で減収ではあるが、原価低減の効果もあり増益となっている。

今後は、太陽電池セルの変換効率やモジュール出力、耐久性など性能面の向上を図るほか、水上ソーラーなど未利用域への展開を可能にする製品開発に努める。また自家消費用の蓄電システムやエネルギーマネジメントシステムなど、周辺機器およびソリューションビジネスへと事業領域を拡大していく方針である²⁸。

²⁷ <http://www.kyocera.co.jp/ir/financial/data.html>

²⁸ 京セラ、「有価証券報告書 2016年3月期 通期」：<http://www.kyocera.co.jp/ir/financial/pdf/yuhu16.pdf>

1.4.5. 東芝

(1) 基本情報

商号	株式会社 東芝（英訳名：Toshiba Corporation）
本社所在地	東京都港区芝浦一丁目1番1号
上場年月（上場証券取引所）	1949年5月（東京証券取引所）
売上高	5.7兆JPY（2016/3期 連結）
総資産	5.4兆JPY（2016/3期 連結）
従業員数	167,091人（2016/9期 連結）, 36,601人（2016/03期 単体）
代表者	綱川 智（2016 - 代表執行役社長）
沿革	<p>1875年：東京に電信機工場を創設、後に一般白熱電球の生産が活発になり、「東京電気株式会社」となる</p> <p>1939年：重電メーカーの芝浦製作所と弱電メーカーの東京電気が合併し「東京芝浦電気」として発足</p> <p>1963年：日本初の12,500W原子力用タービン発電機、衛星通信送電装置を完成</p> <p>1984年：「株式会社東芝」に社名を変更し、本社機能を東芝ビルディングに統合。日本最大規模の燃料電池発電実験プラントの運転に成功</p> <p>2006年：英国のBNFLから、ウェスティングハウス社を約6,370億円で買収</p>

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDAより作成

(2) 事業の概要²⁹

日立製作所や三菱電機とともに日本を代表する総合電機メーカーであり、半導体やインフラ関連、家電など幅広い分野を手がける。電力・社会インフラ事業では、火力・水力・原子力発電システムに加えて、燃料電池、太陽光発電システムや鉄道を始めとした各種社会インフラ機器・システムも提供している。

同社では1990年代に公共・産業用太陽光発電システムのシステムインテグレーターとして太陽光発電事業に参入し、その後、住宅用太陽光発電システム、パワーコンディショナの事業へ参入している。事業開始当初の国内太陽光発電システム市場規模があまり大きくなかったため、太陽光発電システム事業部ではなく、各事業部で個別の取り組みとして対応していた。

しかし、その後、海外市場が拡大したことや国内市場での導入助成策の強化で、市場拡大が期待できる状況になったことから2009年1月にそれまで各事業部に点在していた太陽光発電事業部門を統括する組織として、「太陽光発電システム事業推進総括部」が新設された。

「太陽光発電システム事業推進総括部」は、2011年2月の組織改編により名称を「太陽光発電システム推進部」に変更し、電力流通システム事業部内の所属となった。さらに、2011年4

²⁹ 東芝 ウェブサイトおよびプレスリリース：http://www.toshiba.co.jp/index_j3.htm

月の組織改編で、「電力流通・システム事業部」の所属となった。

なお、同社の太陽光発電システム関連事業は、社会インフラシステム社電力流通事業部の他、東芝グループ内では東芝三菱電機産業システム（株）が公共・産業用システム向けパワーコンディショナの開発と製造を、また東芝プラントシステム社（株）がEPCとして工業・産業用システム施工などを行っている。

<住宅用>

東芝では米国の大手太陽電池メーカーであるサンパワーから調達した単結晶シリコン太陽電池モジュールにオムロン製パワーコンディショナと屋根技術研究所から調達した架台を組み合わせたシステムをもって、2010年4月から住宅用太陽光発電システム市場へ参入した。

同社は、最大モジュール変換効率 250W の太陽電池モジュール「S シリーズ」の他、形状、寸法にバラエティーが豊富な単結晶シリコン太陽電池「V シリーズ」を 2013 年 5 月から発売している。また、同年 8 月からは屋根建材型太陽電池モジュール「F シリーズ」を市場に投入した。「F シリーズ」については大手ハウスメーカーのミサワホームが発売する 10kW 以上の太陽光発電システムを搭載できる戸建て住宅「Solar Max（ソーラーマックス）」シリーズなどで採用されている。

2015 年からは、最大出力 270W、最大モジュール変換効率 18.2%の太陽光発電モジュールを採用した住宅用太陽光発電システム「L シリーズ」の販売を開始した。「L シリーズ」は、モジュール変換効率の向上によって、限られた屋根により多くのパネルを設置でき、多くの発電量を得られるように設計された製品で、同社の従来の単結晶モジュール「V シリーズ」よりも最大モジュール変換効率を 2.8%アップさせている。

「L シリーズ」は、変換効率の向上のため、両面受光セルの採用、セル表面の半導体技術などを取り入れている。両面受光セルとは、セルの裏面にも表面と同じ薄膜層と電極を設け、セル間のすき間から入る斜めの光を吸収して発電効率を向上させたセルである。また、光をよりたくさん取り込めるため、単結晶セル表面のピラミッド形状を、より凸凹にし、発電量を増加させた。さらに単結晶シリコン表面と反射防止コート（AR コート）薄膜層との間に、半導体技術の応用で粒子形状を均一化させたナノ薄膜層を蒸着させることで発電効率を向上させた。

住宅用システムにおいては、大手商社の山善や高島、エクセル、ユアサ商事、鈴与マタイの他、（株）ライジングコーポレーションや三井住商建材（株）などの大手販売業者、東芝系家電・住宅設備機器販売店の「東芝ストア」や家電量販店、住宅メーカーなどを通じて販売を行っている。

<公共・産業用>

同社は、特に公共・産業用のパワーコンディショナ市場で強さを発揮している。同社と三菱電機が 50%ずつ出資して設立した東芝三菱電機産業システム（TMEIC）は、2013 年時点においては、世界の PCS 市場（出荷額ベース）において、SMA ソーラーテクノロジー社（ドイツ）、ABB 社（スイス）、オムロンに並ぶパワーコンディショナ大手メーカーである。しかし、直近 2015 年においては、鴻海精密工業（台湾）や Sungrow（中国）の後塵を拝している。

なかでも太陽光発電向けの大型パワーコンディショナ部門で大きなシェアを獲得している。TMEICの太陽光発電用PCSの出荷実績は、容量ベースで2013年度の1,606MWから2014年度には2,536MWと57.9%増加しており、このうち海外向けは輸出が約5%（2013年度）から約10%（2014年度）に伸びている³⁰。

太陽光発電事業関連子会社

- 東芝プラントシステム（株）：メガソーラー事業
- 東芝三菱電機産業システム（株）：パワーコンディショナ
- 東芝インターナショナル米国社：海外事業
- 東芝インターナショナルヨーロッパ社：海外事業
- 東芝電力流通システムヨーロッパ社：海外事業

1.5 競合他社と日本企業との比較

2000年代後半にかけては、中国を中心に新規参入が増加し、大規模生産と低価格化が進行している。日本の太陽光モジュールメーカーの世界市場シェアは減少しており、太陽電池セル生産地域別シェアの推移によると、2005年には世界市場の50%弱のシェアを持っていたが、2007年には25%となり、2012年には10%弱まで下落している³¹。

セル・モジュールは、供給力過剰状態にあり、その供給価格は2015年で2.2ドル/W（モジュールベース）まで下落している。日本国内を含め世界の太陽電池メーカーでは、既に太陽電池の製造・販売事業では利益を確保することが困難な状況となっており、太陽電池に付加価値を付けた新たなビジネスモデル構築が必要とされている。具体的なビジネスモデルとしては、以下などが想定される。

- 大規模発電所を設置し、発電した電力を販売する電力小売事業への進出（公共・公共・産業向け事業部門）
- 他社のメガソーラーの運転状況を監視し整備するO&M（Operation & Maintenance）事業
- EV（Electric Vehicle）・家電・HEMS（Home Energy Management System）などと太陽電池を組み合わせたスマート電力供給システムや蓄電池を活用した太陽光発電システム（住宅向け事業部門）

³⁰ TMEIC プレスリリース：https://www.tmeic.co.jp/news_event/pressrelease/2015/pdf/20150520_ja.pdf

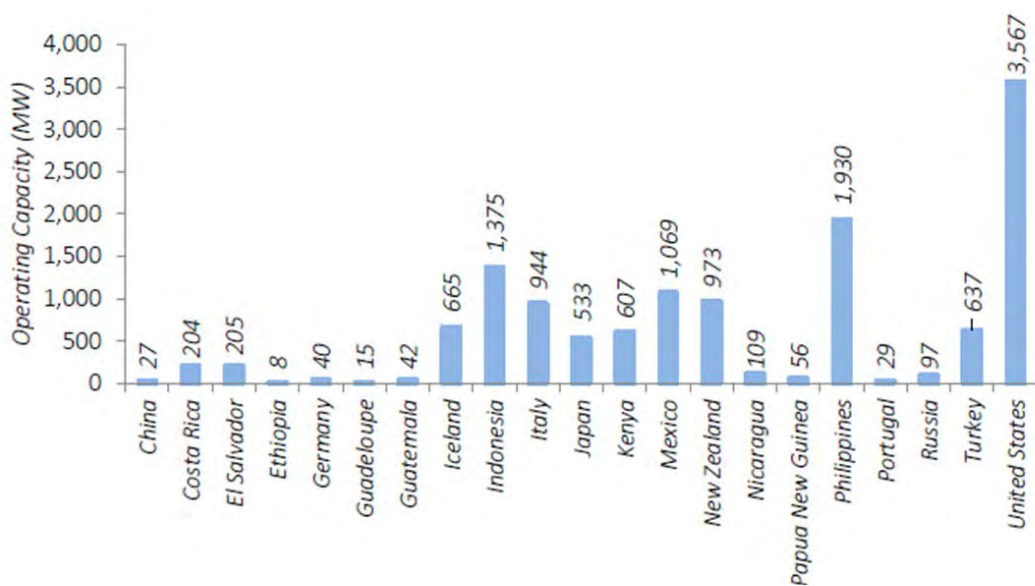
³¹ NEDO, “太陽光発電開発戦略”：<http://www.nedo.go.jp/content/100575154.pdf>

2. 地熱発電

2.1 市場規模

アメリカの地熱エネルギー協会（Geothermal Energy Association：GEA）の“2016 Annual U.S. & Global Geothermal Power Production Report”によると、各国で地熱開発が活発化し、世界の地熱発電の設備容量合計は、世界 24 ヶ国で 2005 年の 8.9GW から 2015 年 13.3GW まで増加した。

図 7：地熱発電容量（国別）2015 年



出典：GEA, “2016 Annual U.S. & Global Geothermal Power Production Report”³²

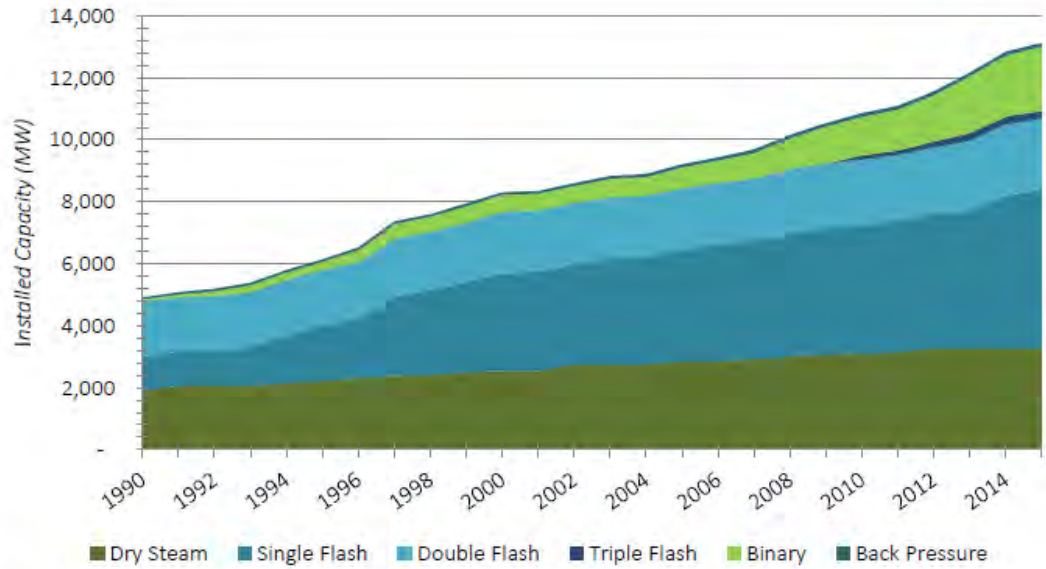
地熱発電に適用される技術は、地熱資源の特性に依存する。バイナリー方式は低温の資源が使われ、フラッシュ方式およびドライスチーム方式では高温の資源が使われる。

「図表：タービン技術類型別の設備容量の推移」に示されているとおり、フラッシュ方式およびドライスチーム方式の技術は、これまでより一般的かつ最も広く活用されてきた。フラッシュ方式の中に、ダブルフラッシュ方式とトリプルフラッシュ方式があり、それら合せて世界の地熱発電量（MW）の 2 分の 3 弱（58%）を構成しており、ドライスチーム方式が約 4 分の 1（25%）、バイナリー方式が 16% を占めている。残り最後の 1% は、バックプレッシャー方式と呼ばれる、非伝統的な技術が含まれている。

タービン技術毎の地熱発電設備容量の変化を時系列で追うと、構成割合を増加しているバイナリー方式について、まだ約 20 年の歴史であるが、さらに低温の資源が、新たに識別、発見され、そして開発されてきていると言える。

³² <http://geo-energy.org/reports/2016/2016%20Annual%20US%20Global%20Geothermal%20Power%20Production.pdf>

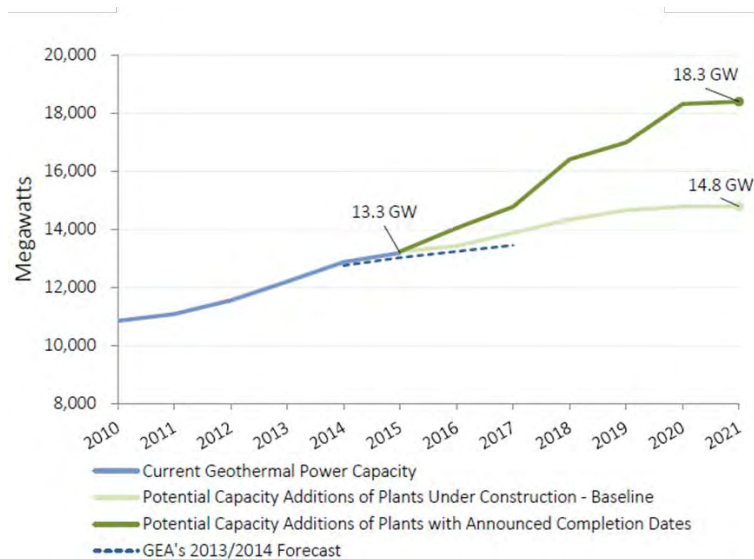
図 8：タービン技術類型別の設備容量の推移



出典：GEA, “2016 Annual U.S. & Global Geothermal Power Production Report”

同報告書によると、地熱発電設備容量は2021年までに18.4GWになると予想している。保守的な見通しとして14.8GWであり、これはすでに建設中で完了日が公表されている発電所で構成されているベースラインの数値である。途上国などで気候変動などの環境変化が益々深刻さを増してくると、エネルギー電源として地熱を選択する傾向は高まり、新規の地熱発電の建設によりベースラインの数値に上乗せされることが予想されている。

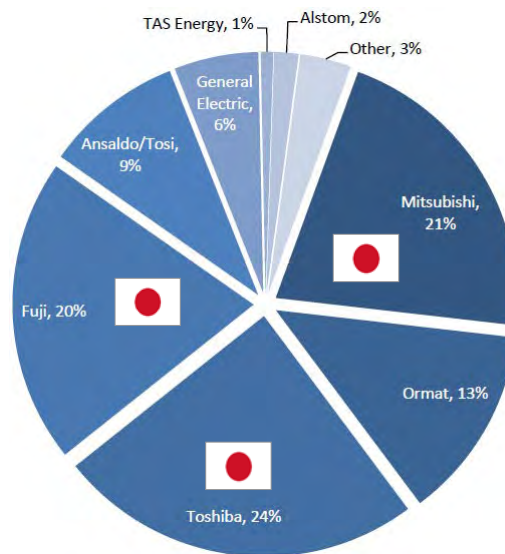
図 9：地熱発電設備容量の将来見通し



出典：2016 Annual U.S. & Global Geothermal Power Production Report

日本のメーカーは、国内における地熱開発のノウハウ・技術力・資本力を活かし、早くから地熱発電機器の製造技術を確立し、世界をリードしてきた。地熱発電所の心臓部といえる地熱発電用タービンは、日本のメーカー3社（東芝、富士電機、MHPS）で導入設備容量の全世界の7割近くのシェアを占めている。海外の地熱発電所を受注しているケースも見られ、商社が日本の発電用タービンメーカー等と協力して、世界の地熱資源を開発している。

図 10：地熱発電設備供給メーカーの世界市場シェア（導入設備容量による割合）

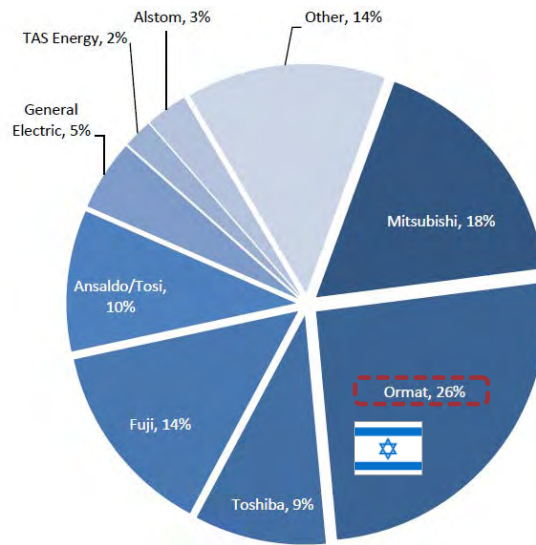


出典：GEA, “2015 Annual U.S. & Global Geothermal Power Production Report”³³

しかし、直近では低温資源により発電が可能なバイナリー方式が地熱資源の乏しい国を中心に普及しており、この分野で急速に力を伸ばしているイスラエルの企業 Ormat 社は、地熱発電プロジェクトの件数割合では世界市場の26%を占めるまでになっている。

³³ <http://geo-energy.org/reports/2015/2015%20Annual%20US%20Global%20Geothermal%20Power%20Production%20Report%20Draft%20final.pdf>

図 11：地熱発電設備供給メーカーの世界市場シェア（地熱発電プロジェクト件数割合）



出典：GEA, “2015 Annual U.S. & Global Geothermal Power Production Report”

2.2 業界再編

【東芝、Ormat】

2015年10月、地熱発電事業のさらなる拡大に向けて戦略的な協業関係を構築することに合意した。Ormatの地熱IPPの開発力、EPC・バイナリー発電機器に関する技術力、グローバルな販売網と、東芝の過去50年にわたるフラッシュ方式の発電設備に関する技術力、ノウハウを組み合わせることで、高効率なコンバインド型地熱発電システムの提案を中心に、地熱資源の特性に応じて最適な設備の提案を通じて他社との差別化を図り、さらなる市場の拡大を目指すとする。なお、本協業の最初のプロジェクトとして、ケニアのメネンガイ（Menengai）地区の地熱開発が実施される³⁴。

³⁴ 東芝 プレスリリース：https://www.toshiba.co.jp/about/press/2015_10/pr_j1501.htm

2.3 個別企業

2.3.1. Ormat

(1) 基本情報

商号	Ormat Industries Ltd (Ormat) (子会社: Ormat Technologies, Inc.)
本社所在地	Chidolovski Way New Industrial Zone Yavne Israel (6225 Neil Road Reno Nevada United States)
設立年	1965年 *非上場 (2004年 Ormat Technologies, Inc ニューヨーク証券取引所上場)
売上高	595百万USD (2015/12期 連結)
総資産	2,293百万USD (2015/12期 連結)
従業員数	1,060人 (2015/12期 連結)
代表者	Isaac Angel (2014 - , Chief Executive Officer)
沿革	1965年: イスラエルの Yavne に Ormat Industries Ltd 設立 1994年: Ormat Industries Ltd の子会社として、Ormat Technologies, Inc. を米国に設立

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDA より作成

(2) 事業の概要^{35 36}

地熱および廃熱回収発電設備の設計、製造、販売、現地施工、関連するサービスを行い、更に、その設備の所有、運転を世界各地で行っている唯一の地熱事業垂直統合企業グループである。イスラエルが本社となる同社は1966年よりバイナリーサイクルの開発を始め、1980年代後半より米国にてバイナリー方式の地熱発電所の建設、運転を行っている。近年では特に、グアテマラ、ケニア、ニュージーランド等の米国以外の地域においても地熱発電プラントを建設している。現在までに20ヶ国以上65地点、合計1,300MW超のバイナリー地熱発電所および蒸気タービンとの複合発電所を建設し、世界に先駆けて二次側の低沸点媒体に有機媒体（ペンタン、ブタンなど）を用いたバイナリー発電を商品化し、世界のバイナリー方式の地熱発電所をほぼ独占状態としている。また、地中から噴出する温水・蒸気を直接利用するフラッシュ式とバイナリー式を組み合わせた高効率なコンバインド型地熱発電システムを世界で唯一提供している。2010年6月にJFEエンジニアリングと米国Ormat Internationalは、地熱バイナリー発電設備の日本国内での業務協定を締結し、日本で初めてバイナリー発電設備を含む生産井坑口から還元井坑口までの一貫地熱発電システムの提供を可能としている。

³⁵ Ormat ウェブサイトおよびプレスリリース：<http://www.ormat.com/>

³⁶ NEDO, “再生可能エネルギー技術白書”：<http://www.nedo.go.jp/content/100544822.pdf>

<地熱バイナリー発電設備の特長>

- 従来のフラッシュ式発電に必要な蒸気（200℃以上）に比較して、低温域（100℃以上）の蒸気・熱水を利用可能
- 高温蒸気を使用できる場合には、蒸気タービン発電とバイナリー発電の複合発電を行うことが可能
- 地熱バイナリー発電設備としては世界最高クラスの発電効率と信頼性を誇り、世界中に1,200MW以上の豊富な納入実績を有す
- 空冷コンデンサーを採用することで、地下から取り出した熱流体を全量地下に還元して資源循環できるので環境負荷が小さい
- 白煙の発生がなく、寒冷地においても周辺への着氷がない
- 単機出力250kWから15,000kW級と、幅広い出力への対応が可能

2.3.2. MHPS

(1) 基本情報（本章4.5.6を参照）

(2) 事業の概要^{37 38 39}

2014年に日立製作所とともにMHPSを設立する以前より、三菱重工業として国内だけでなくアイスランド、インドネシア、米国、フィリピンで地熱発電設備の受注・納入実績がある。また、2010年には、アイスランドの電力会社最大手、レイキャビク・エナジー社と地熱発電で協業することに合意し、レイキャビク・エナジー社は地熱発電事業会社として、地熱エネルギーの開発を地球規模で進める計画を持ち、既にアフリカなどで開発に着手している。地熱発電設備で世界トップの三菱重工業と、世界有数の地熱発電国、アイスランドで開発ノウハウを持つレイキャビク・エナジー社が手を組み、世界規模で地熱エネルギービジネスを展開していくことが想定される。アイスランド向け地熱発電設備の受注・納入累計は、同社向け13基を含め15基に達し、全世界での受注累計は100基超、出力310万kWに及んでいる。

³⁷ MHPS ウェブサイトおよびプレスリリース：<https://www.mhps.com/>

³⁸ 三菱重工業 ウェブサイトおよびプレスリリース：<https://www.mhi.co.jp/>

³⁹ NEDO, “再生可能エネルギー技術白書”：<http://www.nedo.go.jp/content/100544822.pdf>

・MHPSのバイナリー発電システム

MHPS（三菱重工業の時代）は2013年5月に米国のPratt&Whitney Power Systems（PWPS）社を買収した。この買収に伴い、イタリアの有機ランキンサイクル（Organic Rankine Cycle：ORC⁴⁰）タービンメーカーであるTurboden社⁴¹も傘下に収め、バイナリー発電市場へ参入した。

同社には30年以上前にバイナリー発電プラントの開発、政策、実証実験を行った実績がある。熱源は地熱蒸気・熱水、海洋温度差、LNG冷熱、工場排熱と多岐にわたり、発電出力は50～3,000kW、作動媒体もイソブタン、アンモニア、フロンと様々である。このように同社は自社内にもバイナリー発電技術を保有してはいるが、PWPS買収によって最新のORC発電システムも手にすることとなった。

Turboden社ORC発電システムの出力レンジは数百kW～10kWと幅広い。また、1) Heat Recoveryユニット（発電専用）、2) High-Efficiencyユニット（効率重視）、3) CHPユニット（熱電供給）と3種のモデルがあり、品ぞろえも豊富である。

三菱重工業がTurboden社ORCモジュールの販売、プラントエンジニアリング、EPC、アフターサービスを担う。代理店契約を締結したTurboden社のシステムは500kWから1万5,000kWの出力帯に対応している。欧州のバイオマスプラント向けなどでは327台の納入実績があり、国内の排熱改修プラント向け初号機としては、愛知製鋼向けが稼働開始した。

2.3.3. 東芝

(1) 基本情報（本章4.5.4を参照）

(2) 事業の概要^{42 43}

1966年に日本国内初となる岩手県松川地熱発電所に地熱蒸気タービン・発電機を納入して以来、フラッシュ方式を中心として、世界各国に52台、約3,400メガワットの発電設備を納入し、2016年5月現在、地熱発電の累計出力約3.8GWの地熱発電機器を納入している。Bloomberg New Energy Financeによると、これは世界の地熱発電の23%に当たる⁴⁴。

2011年3月には、ニュージーランド・コンタクトエナジー社が建設を予定しているテミヒ地熱発電所のタービン、発電機、復水器を受注。2基の83MW級地熱タービン、発電電動機、復水器を2012年に納入。同年に、ケニアオルカリア発電プロジェクト、インドネシアジャワ島西部バンドン郊外での地熱発電プロジェクトを受注する等、積極的な受注活動を実施している。

⁴⁰ ORC技術は従来の蒸気タービンとしくみが似ているが、大きな違いは高分子有機媒体を蒸発させて利用する点。これにより、タービンの回転速度を低く設定することが可能となり、翼などの部品の浸食もない。また、ORCユニットは工場出荷時にスキッド上で組み立てられるため、輸送が容易。ORCシステムでは、中・高温の熱媒油により、蒸発器内の有機作動媒体を事加熱・蒸発させる。その蒸気によりタービンが回転し、クリーンで安定した発電が行われる。ORCシステムのアプリケーションとしては、地熱、廃熱回収、バイオマス、太陽熱などがある。

⁴¹ Turbodenは、1980年にイタリア・ミラノに設立、ORC専門メーカーとして30年以上の歴史をもち、世界各国に約300台の納入実績がある。

⁴² 東芝 ウェブサイトおよびプレスリリース：http://www.toshiba.co.jp/index_j3.htm

⁴³ NEDO, “再生可能エネルギー技術白書”：<http://www.nedo.go.jp/content/100544822.pdf>

⁴⁴ https://www.toshiba.co.jp/thermal-hydro/renewable/history/geo/index_j.htm

2.3.4. 富士電機

(1) 基本情報

商号	富士電機株式会社（英訳名：Fuji Electric Co., Ltd）
本社所在地	川崎市川崎区田辺新田1番1号
上場年月（上場証券取引所）	1949年5月（東京証券取引所）
売上高	8,136億JPY（2016/3期 連結）
総資産	8,454億JPY（2016/3期 連結）
従業員数	26,716人（2016/9期 連結）, 10,790人（2016/3期 単体）
代表者	北澤 通宏（代表取締役社長）
沿革	1923年：日本の「古河電気工業」と、ドイツの「Siemens AG」 との資本・技術提携により設立 2011年：「富士電機株式会社」に商号変更

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDAより作成

(2) 事業の概要⁴⁵

1960年に日本で初めての地熱発電設備を箱根小涌園に納入した。1970年代からインドネシア、フィリピン、ニュージーランド、アメリカ、アイスランドなど世界各地へ地熱発電設備を納入し、地熱用蒸気タービン発電機の製造・納入において、直近10年間で約40%以上のシェアを有する。これまで国内外で66台の地熱発電用タービンを納入している。

地熱用蒸気タービンに入ってくる蒸気には腐食成分を含む不純物やガスが非常に多く含まれており、通常の火力発電用タービンとは比べものにならないほど過酷である。現在、耐食性を向上させるコーティング技術を開発するなど継続的に技術開発を進め、地熱発電用タービンで世界シェア50%以上を目指している。

2010年に商業運転を開始したニュージーランド ロトカワ地区、同社が納入した地熱発電プラント（ナ・アワ・プルア地熱発電所）は、1基としては140MWと世界最大出力を誇る。2011年には、トルコで1基（60MW）、フィリピンで1基（20MW）を受注した。今後、アフリカ、中南米諸国など新たな地域へも事業を拡大していく計画としている。また水より沸点の低い媒体を地熱エネルギーで蒸発させてタービンを回す「バイナリー発電」システムにも注力しており、2MW標準機を商品化するなど、地熱バイナリー発電についても事業展開を進めている⁴⁶。

・富士電機のバイナリー発電システム

富士電機は地熱発電システムの品揃えを充実させるため、バイナリー発電システムの商品化開発に取り組み、2010年5月に富士地熱バイナリー発電システムの（2,000kW）の販売を開始した。現在複数の国内メーカーがバイナリー発電システムを開発しているが、2,000kW以上の大型設備を開発しているのは同社のみである。同社は火力・地熱発電の技術を応用し、バイナ

⁴⁵ 富士電機 ウェブサイトおよびプレスリリース：<http://www.fujielectric.co.jp/>

⁴⁶ NEDO, “再生可能エネルギー技術白書”：<http://www.nedo.go.jp/content/100544822.pdf>

リー発電設備を製品シリーズ化した。

ラインナップとしては、2,000kW、6,000kW、10,000kWのバイナリー発電用タービンを開発し、商品化している。タービンは3種であるが、熱交換器は熱源の温度・流量に合わせてオーダーメイドで設計し、地熱資源に応じた最適な発電システムを構築する。このようにして、2,000kW弱～10,000kWまで幅広い出力レンジをカバーし、様々な地熱資源に対応する。それと同時に、設計費を最小限に抑制して、発電システムとしてのコスト競争力を保っている。

同社はバイナリー発電設備もフラッシュサイクル同様に、ターンキー方式で提案できる体制を整えている。富士電機製品に加えて世界中から適切なコンポーネントを調達することで、コストダウンを図っている。

(3) 事業の財務概況

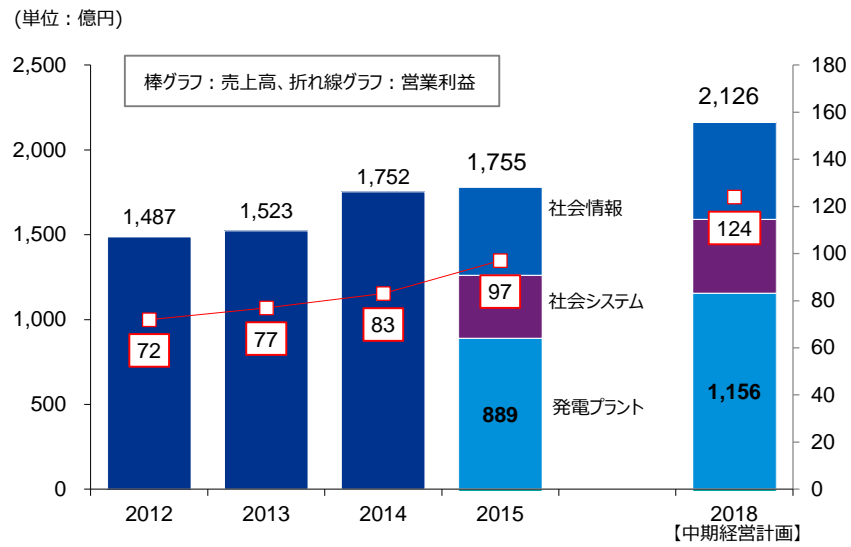
事業の種類別セグメントは、「発電・社会インフラ」、「産業インフラ」、「パワエレ機器」、「電子デバイス」、「食品流通」に区分されており、地熱は「発電・社会インフラ」の「発電プラント」に含まれる。「発電・社会インフラ」の過年度の売上高、営業利益について以下のとおりである。

太陽光発電システムを中心とする再生可能エネルギーの伸長、およびスマートメーターの売上拡大により、2015年度の売上高は1,755億円となっている。

2018年度中期経営計画において、火力・地熱発電の継続的な受注確保とサービス事業の拡大、スマートメーターの取り組み強化ならびに電力システム改革を見据えた新事業の拡大を図る予定としている。地熱発電については、アジアに加え、アフリカ、中南米市場での受注拡大を目指し、国内ではバイナリー地熱発電の受注拡大を目指しており、「発電プラント」の売上高を15年度比30%増の1,156億円に引き上げる計画である⁴⁷。

⁴⁷ 富士電機, “2018年度中期経営計画 発電・社会インフラ事業”:
https://www.fujielectric.co.jp/about/ir/pdf/pre/160526_01.pdf

図 12：富士電機「発電・社会インフラ」の売上高、営業利益の推移



出典：富士電機, “Annual Report 2015”⁴⁸および”Annual Report 2016”⁴⁹を基に作成

⁴⁸ <http://www.fujielectric.co.jp/about/csr/other/box/doc/2015/all.pdf>

⁴⁹ <http://www.fujielectric.co.jp/about/csr/other/box/doc/2016/all.pdf>

2.3.5. JFE エンジニアリング

(1) 基本情報

商号	JFE エンジニアリング株式会社 (英訳名：JFE Engineering Corporation)
本社所在地	東京都千代田区丸の内1-8-1丸の内トラストタワーN 館 19階
上場年月（上場証券取引所）	非上場
売上高	2,835 億 JPY（2016/3 期 単体）
総資産	3,034 億 JPY（2016/3 期 単体）
従業員数	3,747 人（2016/6 期 単体）
代表者	狩野 久宣（代表取締役社長）
沿革	1912 年：日本鋼管株式会社設立 1916 年：株式会社横浜造船所設立（直後、株式会社浅野造船所と改称、1936 年に鶴見製鉄造船株式会社と改称） 1940 年：日本鋼管株式会社と鶴見製鉄造船株式会社が合併（1988 年に呼称を日本鋼管から NKK に統一） 1950 年：川崎重工より分離し川崎製鉄株式会社設立 2001 年：日立造船株式会社、住友重機械工業株式会社と NKK の製鉄プラント部門が事業統合 2002 年：日立造船と NKK の造船部門が事業統合し、ユニバーサル造船株式会社発足、NKK と川崎製鉄が経営統合、持株会社 JFE ホールディングス株式会社を設立 2003 年：JFE エンジニアリング株式会社発足

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDA より作成

(2) 事業の概要⁵⁰

JFE エンジニアリングは 2010 年 6 月に米国の Ormat 社と業務提携を締結し、日本国内での地熱バイナリー発電設備の全体設計、施工、アフターサービスを行っている。

同社は約 50 年前から地熱発電所の蒸気生産設備・輸送設備の設計・施工を手掛けており、地形、購買、蒸気性状等に応じた最適なプラント設計・施工を強みとしてきた。Ormat 社の地熱バイナリー発電設備は汎用品ではなく、熱源の特性に合わせたシステムをオーダーメイドで設計・制作する。最適な発電システム設計のためには蒸気・熱水の流量、温度、性状等の坑井特性に応じた設計が重要であり、ここに JFE エンジニアリングのノウハウを活用する。

製品仕様の詳細は公表されていないが、出力レンジは 250~15,000kW 級まで幅広く対応している。作動媒体は熱源条件等に応じて複数の媒体から適切なものが選択される。（ノルマルペンタン、イソブタン等）。熱源入口条件は 100℃以上の蒸気・熱水で、MW 級のプラントの場合、

⁵⁰ JFE エンジニアリング ウェブサイトおよびプレスリリース：<http://www.jfe-eng.co.jp/>

目安として、約 1t/h（トン・パー・アワー）の蒸気で約 100kW の発電出力が可能である。

基本的には空冷方式を採用し、地熱流体全量を地下に還元する。冷却水の確保が容易な場所等では水冷方式も選択可能で、温められた冷却水の温水を利用することもできる。例えば、現在温泉発電の事業化が検討されている福島県の土湯温泉では、150℃で 60t/h の蒸気・熱水と、15℃で 110t/h の冷却水から、発電出力 500kW 及び温泉給湯（蒸発量：170t/h、61℃）を得るという事業モデルが示されている。また、Ormat 社のバイナリー発電設備は地熱向けに開発されたシステムであり、外部熱交換器は不要で、熱源を直接蒸発器に導入することができる。

2.4 競合他社と日本企業との比較

日本は、地熱発電に適した摂氏 200 度以上の熱水を容易に得られる恵まれた地熱資源大国であり、これまで自国で培った地熱資源開発の能力の利活用が途上国においても可能である。前述のとおり、世界市場シェア約 7 割をほこる日本企業のもつ地熱発電機器の製造技術で世界をリードするとともに、バイナリー発電方式や高効率なコンバインド型地熱発電システムなど、資源の少ない途上国ニーズを満たす技術開発に産官学が共同で実施することが必要である。

3. 風力発電

3.1 市場規模

世界の風力発電累積導入量は、2015年末時点で432.9GWである。このうちアジア地域が175.8GWで最も多い。続いて欧州地域147.8GW、北米地域88.7GWの導入量がある。国別には、中国が145.4GW（世界累積導入量の約34%）と最も多く、次いで米国74.5GW、ドイツ44.9GWが多い。また、インドが25.1GWとスペイン23.0GWを累積導入量で追い抜いている。

これまで世界の風力発電市場は、欧州諸国と米国が牽引してきたが、2009年以降は中国が世界最大のマーケットとなっており、近年ではインド含むアジア市場が中心となってきている。これは、先進国において、陸上での風力発電適地確保が困難となり、また金融危機、シェールガスの登場といった各種事情を反映している。

GWECによると、2020年には世界の風力発電システム累積導入量は792.1GWまで伸びると予想しており、欧州や北米地域の成長が緩やかな中、今後も強い成長を見せるのはアジア地域であると見ている。また、アジアのほか、ラテンアメリカ地域のブラジルや中東及びアフリカ地域の新興市場も伸びると予想している。

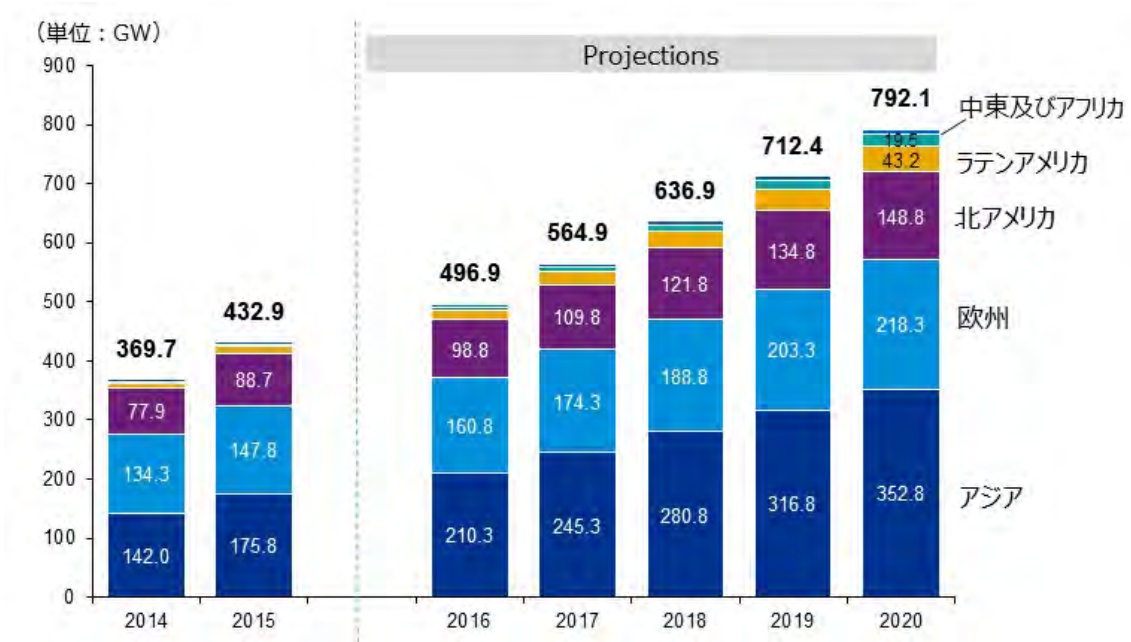
図 13：世界の風力発電累積／新規導入量の推移



出典：GWEC, “Global Wind Report 2015”⁵¹を基に作成

⁵¹ http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf

図 14：世界の風力発電累積導入量の推移（地域別）



出所：GWEC, “Global Wind Report 2015”⁵²を基に作成

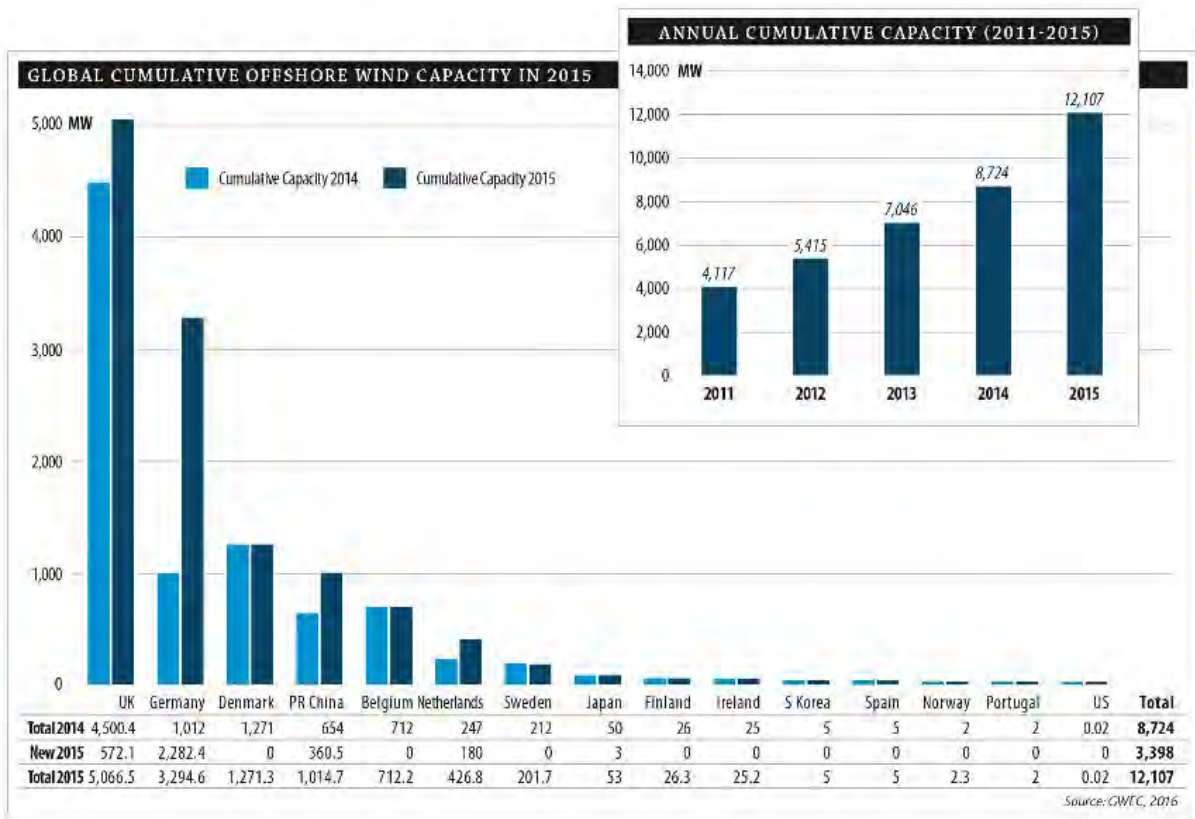
3.2 洋上風力発電

陸上平野部における風力発電の適地が減少していることから、陸上風力と比較して今後の成長が期待される洋上風力発電に注目が集まっている。

欧州（イギリス、ドイツ、デンマーク、ベルギーなど）や中国を中心に拡大を続けており、2015年の洋上風力発電新規導入量は3,398MWであり、累積導入量は12,107MWと前年比39%増加した。世界の洋上風力発電導入量の91%以上（11,028MW）は、バルト海域、アイルランド海域、イギリス海峡につながる北欧地域に設置されているものである。ノルウェーの Statoil が2009年に建設した「Hywind」（2.3MW x 1基、総出力 2.3MW）が世界初の大型浮体式洋上風力発電施設である。その後、2011年にポルトガルの「WindFloat」（2.0MW*1基、総出力 2.0MW）でも実証試験が開始された。

⁵² http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf

図 15：洋上風力発電導入量の推移および地域別年導入量（2015年）



出典：GWEC⁵³

中国では、福建省、広東省および江蘇省の海域にて洋上風量発電プロジェクトが実施された。中国の洋上風力発電プロジェクトの大半は、潮間帯⁵⁴プロジェクトと呼ばれ、岸に近い浅瀬に設置される。深海域でのプロジェクトのほとんどは、まだ実証段階、もしくは建設が開始されたばかりで稼働には至っていない⁵⁵。

⁵³ <http://www.gwec.net/global-figures/global-offshore/>

⁵⁴ 高潮時の海岸線と低潮時の海岸線との間の帯状部分。低潮時は干上がって陸地となる。この潮間帯は潮差が大きいほど広く、海岸の勾配が小さいほど広い。

⁵⁵ <http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2016/05/Global-offshore-1.pdf>

表 3：中国の2015年新規洋上風力発電プロジェクト一覧

省	プロジェクト名	デベロッパー	メーカー	発電設備容量 (MW)
福建省	Long Yuan Nanri Island 4.0	Long Yuan	Shanghai Electric	12
	Ping Haiwan Wind Farm	Zhong Min	XEMC	50
広東省	Huaneng Zhejiang Halmen	Huaneng	Dongfang	1.5
江蘇省	Jiangsu Dafeng	Tianrum Goldwind	Goldwind	3
	Jiangsu Dafeng	Tianrum Goldwind	Goldwind	6
	Longyuan Ruding 4.0	Longyuan	Shanghai Electric	100
	Three Gorges 4.0	Three Gorges	Shanghai Electric	32
	CPI Binhai	China Energy Investment	Shanghai Electric	20
	CGN Rudong 4.0	China Guangdong Nudear	Shanghai Electric	56
	Sinohydro Rudong 2.5	Sinohydro	Shanghai Electric	80
合計 (MW)				360.5

出典：GWEC⁵⁶

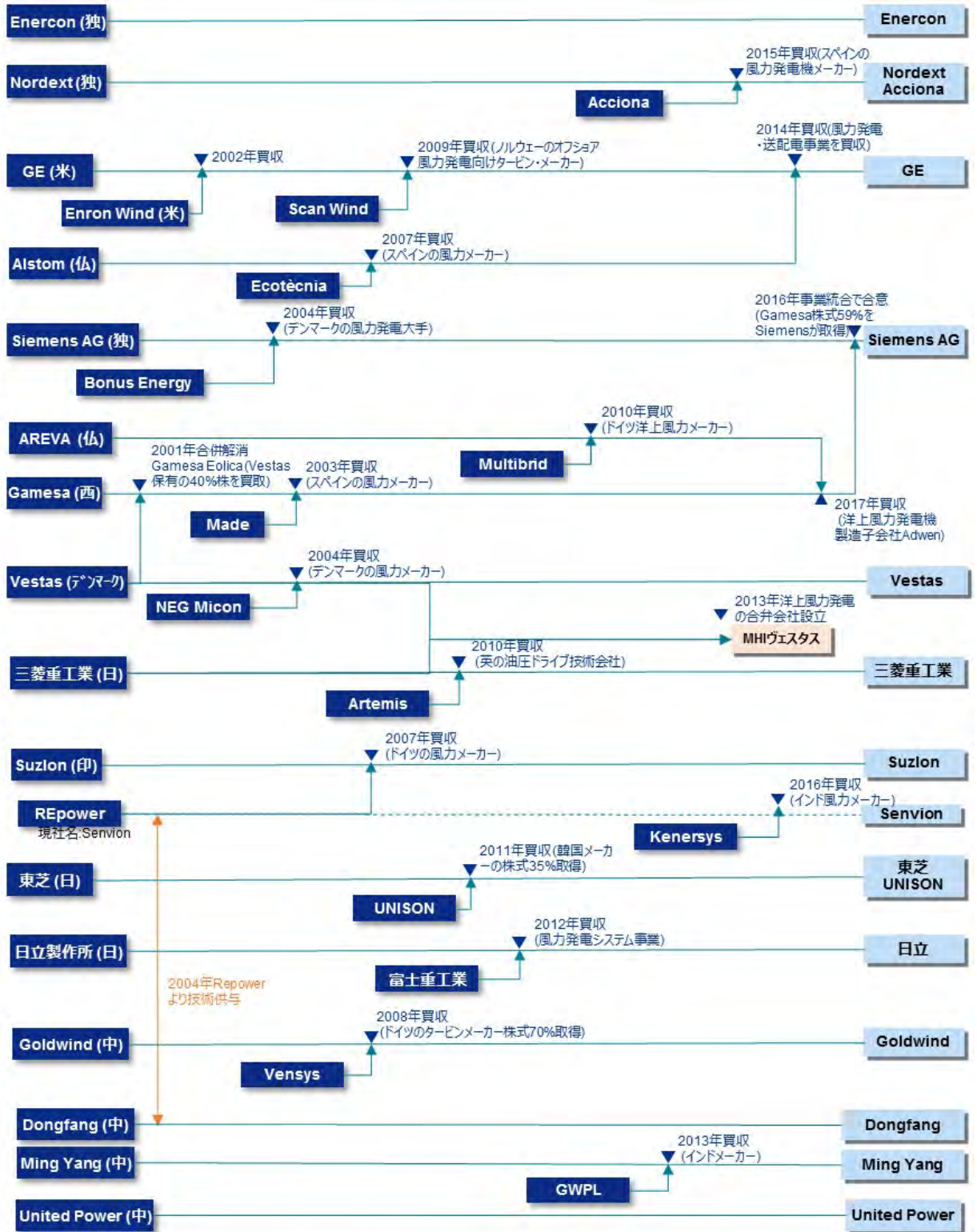
3.3 業界再編

世界の風力マーケットについては、Big 3 による陣取り合戦の様相 (Vestas、GE Wind、Siemens / Gamesa 連合)。(中国の Goldwind は中国国内で No.1 シェアのため、必然的に世界シェアでも No.1)

M&A についても、GE Wind は風力会社の買収 (Vertical) だけでなく、部品会社も買収 (Horizontal) してきた。Siemens / Gamesa 連合について、Siemens は高品質・高価格帯の製品を扱い、Gamesa は中品質・低価格帯の製品を扱っていると一般的には見られている。

⁵⁶ <http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2016/05/Global-offshore-1.pdf>

主要事業者間の買収・提携関係



・・・風力発電事業を世界展開する企業

出典：各社のウェブサイトを基に作成

3.4 個別企業

3.4.1. Vestas

(1) 基本情報

商号	Vestas Wind Systems A/S (Vestas)
本社所在地	Hedeager 44 8200 Aarhus N, Denmark
上場年月	1998年4月(コペンハーゲン証券取引所)
売上高	84.2億EUR(2015/12期 連結)
総資産	85.9億EUR(2015/12期 連結)
従業員数	21,781人(2016/6期 連結)
代表者	Anders Runevad (2013 - , Group President & CEO)
沿革	<p>1898年：工場用のスチール窓製造事業を設立</p> <p>1945年：家電と農業機器の製造事業会社であるVestas社を設立</p> <p>1979年：Vestas社が初めて風力タービンを製造</p> <p>1986年：Vestas社の大部分が売却されたことによって、風力エネルギー事業のみをするVestas Wind Systems A/S社が誕生</p> <p>2004年：デンマークの風力タービン製造時業者であるNEG Micon A/Sと合併</p>

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDAより作成

(2) 事業の概要⁵⁷

Vestasは風力発電に特化し世界展開しているエネルギー企業であり、風力発電タービン、システム関連設計、製造、販売を行っている。加えて、風力発電ソリューション（保守、プロジェクト計画コンサルティング、風力電力関連公共政策・規制コンサルティング、グリッドコンプライアンス、技術アドバイザリー、調達等）を提供している⁵⁸。

2014年1月にデンマークのウスタイル(Osterild)に設置されたVestas社のV164型出力8MW試作型タービンは、現在設置されている洋上風力タービンの中でも最大出力を誇る。これは三菱重工業とVestas社の洋上風力事業の合併会社であるMHI Vestas社により開発された。他の8MWの出力を誇る風力タービンは、Areva社とGamesa社の共同開発によるものである。このタービンの商業生産は2018年に予定されている。このタービンは2021年にフランス沖のトレポー(500MW)と、Yeu島とNoirmoutierの風力発電施設に設置される予定である⁵⁹。

⁵⁷ Vestas ウェブサイトおよびプレスリリース：<https://www.vestas.com/>

⁵⁸ Vestas, “Annual Report 2015”：
https://www.vestas.com/~media/vestas/investor/investor%20pdf/financial%20reports/2015/fy/2015_annualreport.pdf

⁵⁹ http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/observ/barojde16_WindEnergy_EN.pdf

三菱重工業との協働

2014年4月には、三菱重工業と折半出資で洋上風力発電設備合弁会社の MHI Vestas Offshore Wind A/S (MHI Vestas) を設立した。三菱重工業は、急成長している洋上風力発電市場でトップメーカーとして勝ち残るため、今後も両社対等な協力関係を維持することを決め、洋上風力発電のグローバルリーダーを目指している。

洋上風力発電事業者の DONG Energy が英国で進める出力 33 万 kW 級のウォルニー洋上風力発電拡張プロジェクト向けに、世界最大出力 8,000kW の洋上風力発電設備「V164-8.0MW」を 40 基受注した他、保守サービス契約も締結した。建設開始は 2017 年である。直近では英国の洋上風力発電所向けに世界最大出力 8,000kW 級の洋上風力発電設備「V164-8.0MW」を 5 基受注した。設備の完成と実証開始は 2017 年の予定。契約には 15 年間の完全保守サービスも含まれる⁶⁰。

3.4.2. GE

(1) 基本情報 (本章 4.5.1 を参照)

(2) 事業の概要⁶¹

GE は 2002 年、Enron Wind 社の風力発電部門を買収し、風力発電市場に参入した。同社は、「1.x」と「2.x」の 2 つのプラットフォームを有し、1.5MW から 3.2MW の風車をラインナップしている。1.x は米国を中心として世界的に大ヒットしたシリーズであり、全世界で 21,000 基以上、日本国内でも 240 基以上導入されている。ドライブ方式は増速器+二次巻線誘導発電機のブレードピッチ制御タイプである。風力発電システムの導入量拡大に伴い、系統連系要件が厳しくなってくると、増速器+同期発電機+フルコンバータタイプの 2.x シリーズが開発された。しかしその後、二次巻線技術の進展と同社の電気制御ノウハウによって二次巻線タイプでも高い電力品質を確保できるようになったことから、現在は 2.x も従来の増速器+二次巻線誘導発電機の変速運転タイプとなっている。2.x は世界で 1,500 基以上、日本国内では 40 基以上導入されている。従来の機構を採用するメリットは 2 つある。1 つは 1.x の経験をフル活用することができるため、効率性・信頼性をより高めることができる点。もう 1 つはコンバータ容量が 1/3 で済み、このコストメリットを活かすことで発電コストを抑えることができることである。

⁶⁰ 三菱重工業 プレスリリース : <https://www.mhi.co.jp/news/story/170117.html>

⁶¹ GE ウェブサイトおよびプレスリリース : <http://www.ge.com/>

3.4.3. Siemens

(1) 基本情報（本章 4.5.2 を参照）

(2) 事業の概要⁶²

Siemens は 1980 年から風力発電に取り組んでおり、2004 年、Bonus Energy 社を買収して風力発電市場に本格参入した。同社は陸上で「G2」「D3」、洋上で「G4」「G6」の計 4 つのプラットフォームを有し、2.3MW から 6.0MW の風車をラインナップしている⁶³。

「G」は増速器 + かご型誘導発電機のギアードタービン方式で、G2 は世界中で 6,000 基以上のベストセラーとなっている。「D」は永久磁石同期発電機を採用したダイレクトドライブ方式で、可動部品数をギアードタイプの半分以下に低減し、保守性・信頼性を向上させている。一般的に、風車は大型化すると機械的ストレスが大きくなり、ギアボックスの損傷率も上昇する。同社は風車を大型化する時には故障ポイントを失くすという設計アプローチを行っているため、このようなラインナップとなっている。

4 つのプラットフォームすべて共通でフルスケールコンバータが搭載され、様々な系統連系要件に高い水準で対応している。また、ブレードには同社の独自技術である「Integral Blade」が採用されている。同社のブレードは一体成型による一貫工程で製造されるため、軽量かつ高強度であり、さらに亀裂や落雷等による損傷の原因となるシール部がないという点で特徴的である。生産・販売・メンテナンス体制は以下のとおりである。

表 4：Siemens 生産・販売・メンテナンス体制

生産拠点	世界 6 拠点 <ul style="list-style-type: none"> ・デンマーク：Brande（ナセル）、Aalboag（ブレード） ・中国：上海（ブレード・ナセル） ・米国：Hutchinson（ナセル）、Fort Madison（ブレード） ・カナダ：Tillsonburg（ブレード）
販売拠点	世界 4 拠点：ドイツ（事業本部）、デンマーク、米国、中国 <ul style="list-style-type: none"> ・日本国内はシーメンス・ジャパン 風力発電部が窓口
サービス内容	・メーカー保証&稼働率保証が標準。部品保証サービス、洋上サービスも提供し、最長 20 年間に亘り稼働率の最大化に努める。

出典：Siemens ウェブサイト⁶⁴を基に作成

事業規模について、直近 3 カ年の「風力発電&再生可能エネルギー」セグメントの実績について、以下表に占めすとおりである。

⁶² Siemens ウェブサイトおよびプレスリリース：<https://www.siemens.com/global/en/home.html>

⁶³ Siemens ウェブサイト、<http://www.energy.siemens.com/hq/en/renewable-energy/wind-power/platforms/>

⁶⁴ <http://www.siemens.com/global/en/home/markets/wind.html>

表 5：Siemens 風力発電&再生可能エネルギーセグメントの業績推移

	2013年	2014年	2015年
受注（百万 EUR）	6,870	7,759	6,136
売上（百万 EUR）	5,382	5,567	5,660

出典：Siemens, “Annual Report 2014”⁶⁵および”Annual Report 2015”⁶⁶を基に作成

2016年6月には、スペインの風力発電機メーカーの Gamesa（Gamesa Corporacion Tecnologica SA）との風力発電機事業合併で原則的に合意したと発表した。これにより世界最大手の風力発電機メーカーが誕生するとされている⁶⁷。

（参考：Gamesa）

（1）基本情報

商号	Gamesa Corporacion Tecnologica SA（Gamesa）
本社所在地	Parque Tecnologico De Bizkaia, Edificio 222 Zamudio Vizcaya Spain
上場年月	2000年10月（スペイン証券取引所）
売上高	35.0億 EUR（2015/12期 連結）
総資産	46.4億 EUR（2015/12期 連結）
従業員数	7,283人（2015/12期 連結）
代表者	Ignacio Martin（2002- Chairman & CEO）
沿革	1976年：再生可能エネルギー分野の製造企業として設立 1994年：風力発電事業を開始

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDA より作成

3.4.4. Goldwind

（1）基本情報

商号	Xinjiang Goldwind Science & Technology Co., Ltd （新疆金风科技股份有限公司、Goldwind）
本社所在地	Boxing All The Way 8 Beijing Economic And Technological Development Zone Beijing China
上場年月	2007年12月（深セン証券取引所）
売上高	300.6億 CNY（2015/12期 連結）
総資産	525.7億 CNY（2015/12期 連結）
従業員数	6,712人（2016/6期 連結）
代表者	Wu Gang（Chairman）、Wang Haibo（President）

⁶⁵ http://www.siemens.com/annual/14/en/download/pdf/Siemens_AR2014.pdf

⁶⁶ http://www.siemens.com/investor/pool/en/investor_relations/Siemens_AR2015.pdf

⁶⁷ <http://jp.wsj.com/articles/SB11715478495720544299904582134273774379692>

沿革	1998年: 風力発電機メーカーとして設立
----	-----------------------

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDA より作成

(2) 事業の概要⁶⁸

Goldwind は、中国を代表する風力タービンメーカーとして、強力かつ独立した研究開発能力と中国国内の風力エネルギー部門で最も長い操業の歴史を誇る。同社の永久磁石直接駆動（permanent magnet direct drive：PMDD）技術は、世界の風力エネルギー業界の最先端となっている。Goldwind のタービンは中国全土で操業されているほか、欧州や南北アメリカなどの主要な国際市場でも販売されている⁶⁹。

(参考：その他中国企業 ～ Shanghai Electric、Dongfang)

商号	Shanghai Electric Group Co., Ltd (上海電氣集團股份有限公司、Shanghai Electric)
本社所在地	Qin Jiang Road, No. 212 Shanghai China
上場年月	2005年4月 (上海証券取引所)
売上高	780.0億 CNY (2015/12期 連結)
総資産	1,621.2億 CNY (2015/12期 連結)
従業員数	25,853人 (2016/6期 連結)
代表者	Dinan Huang (2004 - , Chairman & Chief Executive Office)
沿革	1952年: 中国国営企業として6,000kW級スチームタービン発電機製造から事業をスタート

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDA より作成

商号	DONGFANG ELECTRIC CORPORATION LIMITED (東方電氣股份有限公司、Dongfang)
本社所在地	No.333 Suhan Road Sichuan Chengdu China
上場年月	1994年6月 (香港証券取引所)
売上高	360億 CNY (2015/12期 連結)
総資産	861億 CNY (2015/12期 連結)
従業員数	20,314人 (2015/12期 連結)
代表者	Shu Gang Wen (Chairman & Chief Executive Officer)
沿革	1958年: Dongfang Electric Machinery Plant として設立 2007年: Dongfang Electric Corporation Limited へ社名変更

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDA より作成

⁶⁸ Goldwind ウェブサイトおよびプレスリリース : <http://www.goldwindglobal.com/web/index.do>

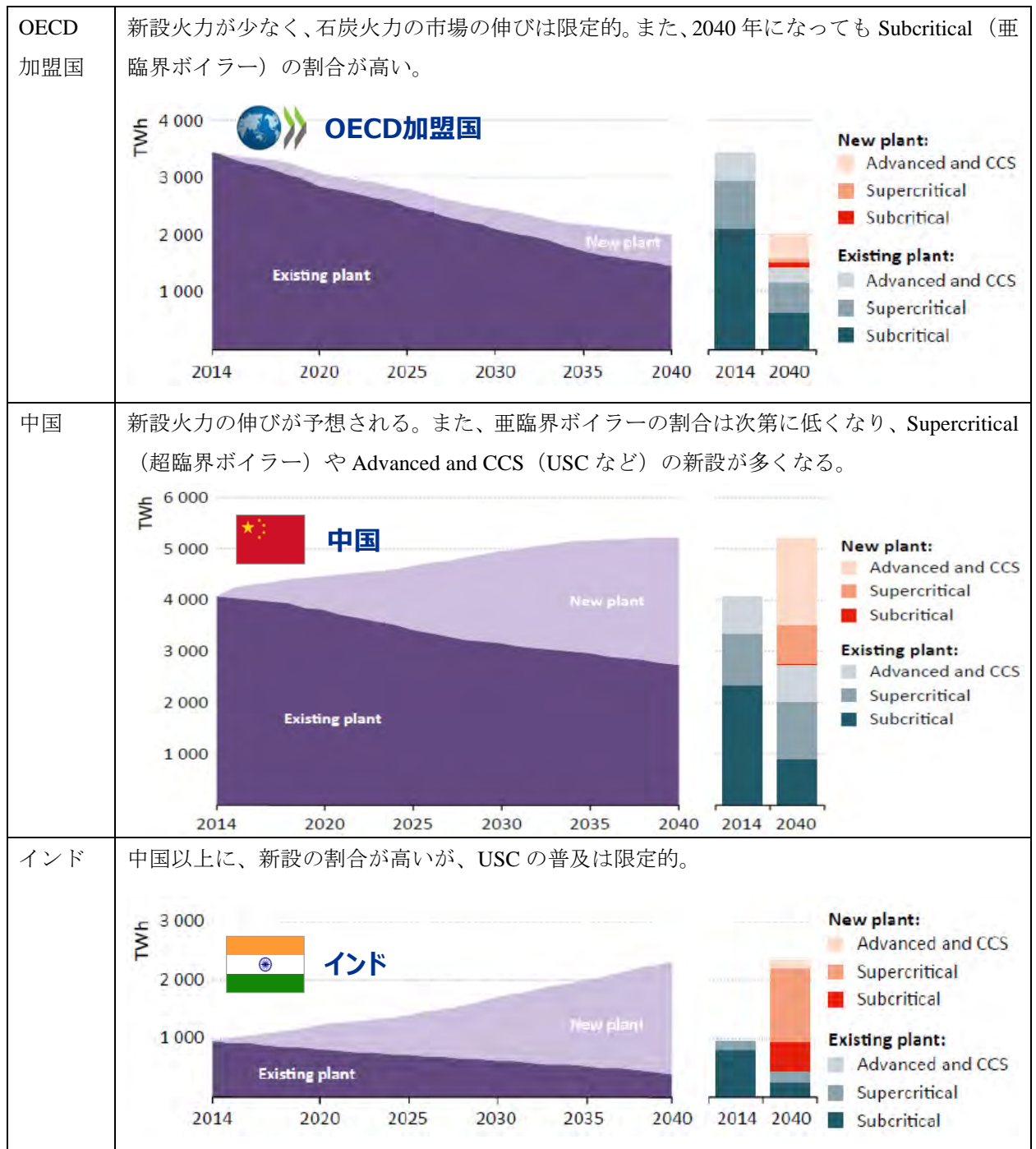
⁶⁹ <http://www.goldwindglobal.com/web/about.do?action=detail2&id=201007301137174364>

4. 高効率火力発電

4.1 市場規模

IEA“World Energy Outlook 2015”によると、今後の世界の石炭火力発電市場の見通しは以下となっている。

図 16：今後の世界の火力発電市場【石炭火力発電技術別】

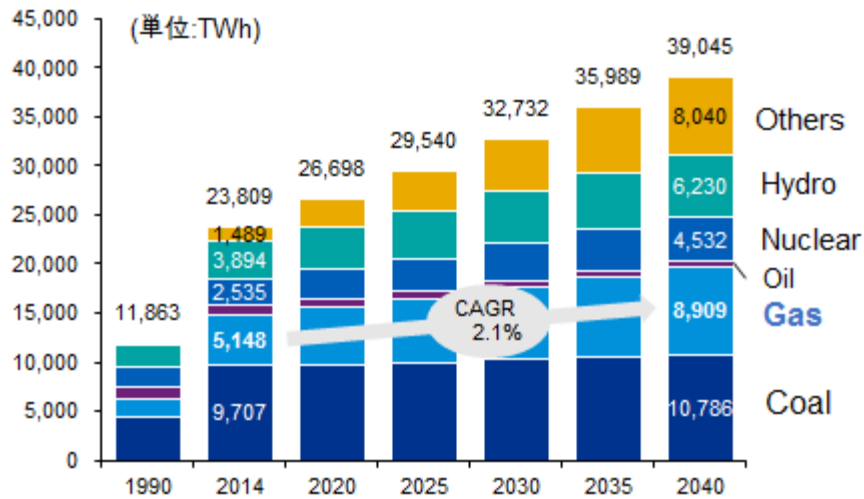


*WEO 新政策シナリオ：直近の気候変動に関する政府の政策公約の内、具体化されていないものも含めて着実に実施されるケース

出典：IEA, “World Energy Outlook 2015”を基に作成

天然ガス火力発電市場についても。IEA”World Energy Outlook 2016”の中で見通しが示されており、2040年には8,909TWhの発電電力量となり、対2013年比で1.7倍となりシェアも増す。

図 17：世界の発電電力量見通し（WEO 新政策シナリオ*）

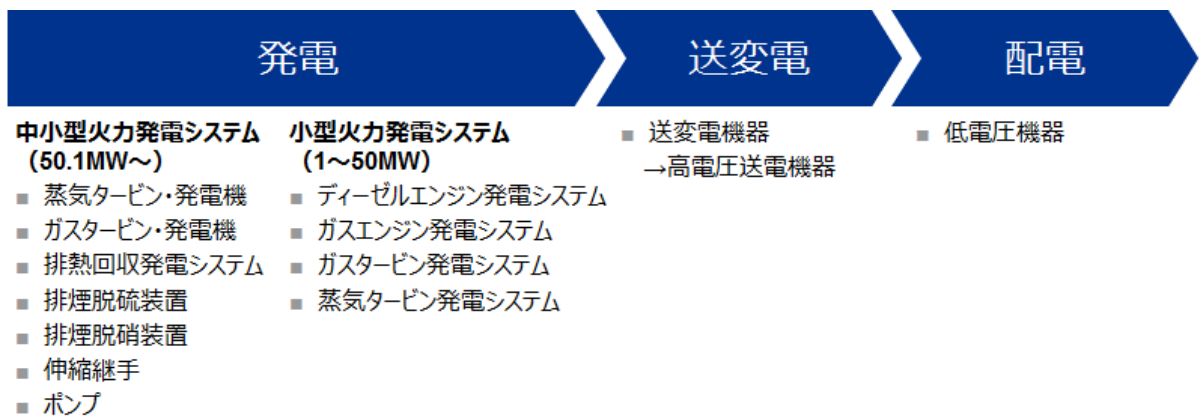


*WEO 新政策シナリオ

出典：IEA”World Energy Outlook 2016”を基に作成

4.2 高効率火力発電のコンポーネント

高効率火力発電について、発電・送変電・配電の3つのプロセスに分けられる。川上の発電機器は世界的なメジャープレイヤーによる発電効率の研究開発競争が激しい。



出典：富士経済, ”World Wide 火力発電関連ビジネス市場の現状と将来展望”を基に作成

4.3 ガスタービン市場の世界シェア

天然ガスを燃料とした発電効率の高いガスタービンコンバインドサイクル発電 (GTCC) は、新興国含む世界市場は拡大しており、GTCC の主機であるガスタービン市場シェアの大半を日欧米メーカーが占める。中でも米国 GE が約 5 割と圧倒的なシェアを誇っている。

ガスタービンにおいて、コモディティ化が進行しない最大の要因は、新興国企業の容易な追従を許さない技術的なハードルの高さがあると言われている⁷⁰。ムーンライト計画当時からプロジェクトに参画してきた三菱重工業から引き継ぎ、ガスタービンの自社開発を進めている日本の MHPS についても、欧米勢がけん引する大型ガスタービン分野において、世界最高性能の大型ガスタービンを次々に開発している。今後、GTCC だけでなく、石炭ガス化発電 (IGCC) の拡大も見込まれていることから、ガスタービン市場は拡大傾向で推移していくと予測される。

4.4 業界再編⁷¹

川上の発電、高電圧送変電機器ほどエネルギー効率に影響を与えるため、世界的プレイヤーが技術力を競っている。極めて厳しい競争環境であるため、特に欧米企業を中心に主要プレイヤー間で 80 年代後半以降から再編が発生している。

2014 年 6 月には Alstom のエネルギー部門についての争奪戦が起こった。General Electric (GE) が 2014 年 4 月に買収を提案したことが発端となり、仏政府の対抗策として Siemens AG が参加した。その後、交渉の過程で Siemens AG に三菱重工業が合流した。GE と Siemens AG・三菱重工業連合による条件闘争の結果、Alstom は GE の提案を受け入れ、2015 年 11 月に買収完了となった。

一方、今後成長が期待される新興国や交換需要が見込まれる地域で拡販するために、地場の重電大手や電力大手との提携もしくは合弁会社の設立が多く行われている。

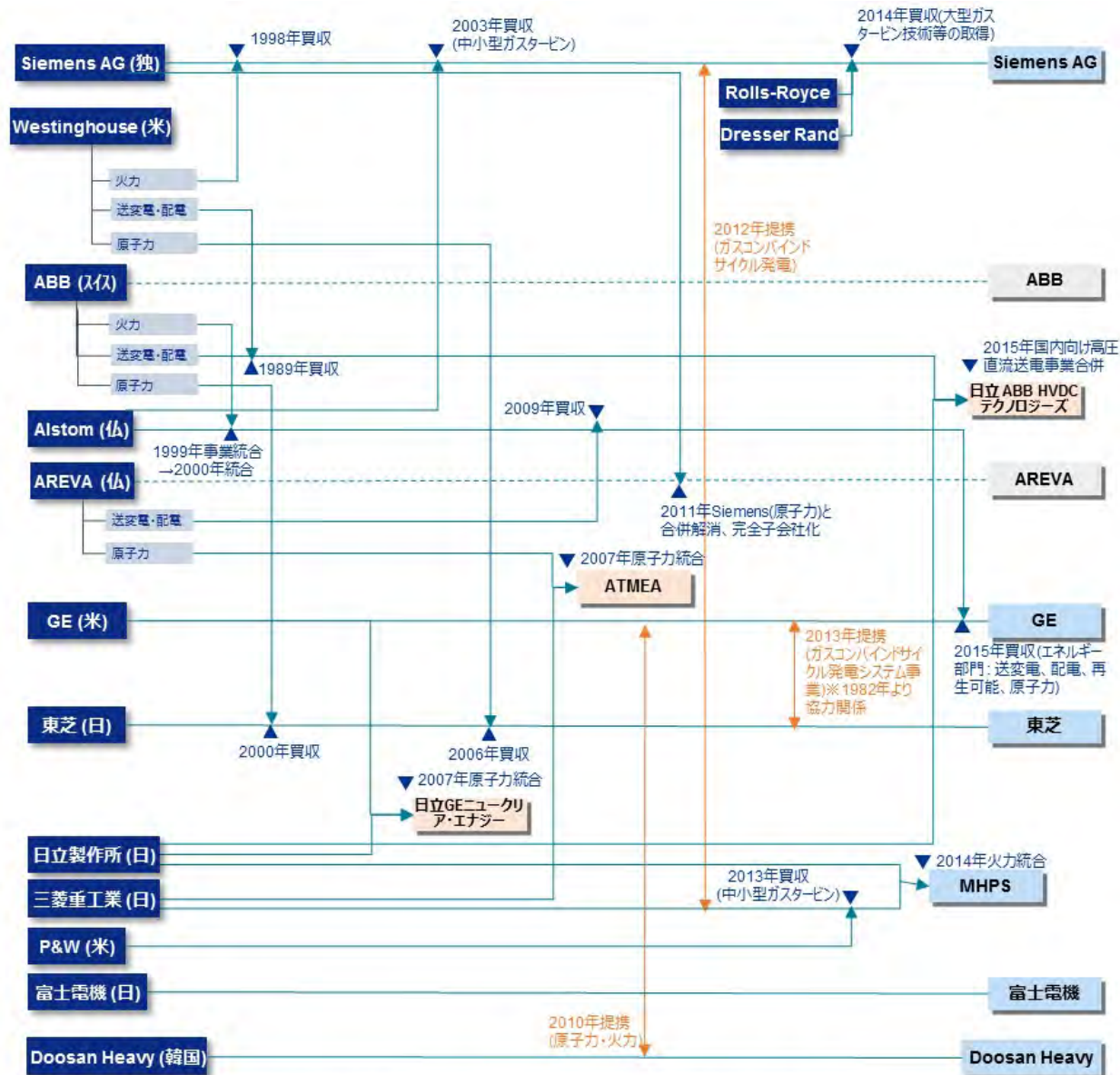
配電機器は、世界的プレイヤー⁷²も参入しているが、技術の成熟度や製品の製造・供給・営業体制で現地化が求められるため、地場のプレイヤーも多く参入している。Schneider Electric (シュナイダー・エレクトリック、FRA) や Eaton Corporation (イートン・コーポレーション、USA) など、川下の配電機器や中・低電圧領域の送変電機器を世界的に展開している企業もあり、これらの企業はスマートグリッド向けのエネルギー管理ソリューションなどと合わせた事業拡大を志向している。

⁷⁰ みずほ銀行，“GE 重電事業にみるイノベーション戦略 —技術リーダーシップを目指すために—”：
https://www.mizuhobank.co.jp/corporate/bizinfo/industry/sangyou/pdf/1045_02_03.pdf

⁷¹ 会社ウェブサイト、ニュースリリース等を基に作成

⁷² ほとんどの企業は発電や高電圧送変電機器を手掛け、加えて一部は配電機器も扱う。

主要事業者間の買収・提携関係



…高効率火力発電事業を世界展開する企業

出典：各社ウェブサイトを基に作成

4.5 個別企業

4.5.1. GE

(1) 基本情報

商号	General Electric Company (ゼネラル・エレクトリック、GE)
本社所在地	41 Farnsworth St, Boston, MA 02210 United States
上場年月 (上場証券取引所)	1892年6月 (ニューヨーク証券取引所)
売上高	1,174億USD (2015/12期 連結)
総資産	4,927億USD (2015/12期 連結)
従業員数	333,000人 (2015/12期 連結)
代表者	Jeffrey R. Immelt (2001 -) (Chairman of the Board and Chief Executive Officer)
沿革	1878年: トーマス・エジソンがエジソン電気照明会社を設立 1892年: トムソン・ヒューストン・カンパニーと合併し、ゼネラル・エレクトリックとして設立 1896年: ダウジョーンズ工業平均の構成銘柄に組み込まれる (算出開始以来唯一残存している企業) 2006年: 日立製作所と原子力部門を統合し、日立 GE ニュークリア・エナジーを設立 2015年: 4つの主要な事業の一つであった GE キャピタルの事業から事実上撤退を発表

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDA より作成

(2) 事業の概要⁷³

重電機器に加え、航空機エンジンや鉄道などの輸送用機器、医療用電子機器、各種ファイナンス事業などを手掛けるコングロマリットである。事業ポートフォリオの中で、重電機器は Power セグメント、Renewable Energy セグメント、Oil & Gas セグメントおよび Energy Management セグメントが取り扱う。Power セグメントは石炭火力・ガス火力発電など各種発電機器を扱う。Renewable Energy セグメントでは、Alstom 買収に伴う、Alstom 風力、水力に加え、既存の風力、新興国進出ビジネス、太陽光などを扱う。Oil & Gas セグメントではタービンなど、システム全体を販売し、さらに5つの領域に分かれている。Energy Management セグメントでは、送変電機器やスマートメーターも含む配電機器、電力系統全体を制御するソリューションの提供などを行っている。

同社はガス火力発電拡大を背景としたガスタービン市場の成長に特に注力している。また、周辺事業の買収を積極的に行っており、重電機器を含むエネルギー関連事業では2001年から2010年の間に90件以上の買収を110億USDかけて行っている。2015年11月、同社による

⁷³ GE ウェブサイトおよびプレスリリース：<http://www.ge.com/>

Alstom のエネルギー部門買収（取得価額 124 億ユーロ）は、重電業界の勢力図を特に大きく変更した。ガスタービンを含む発電事業は直接取得するものの、送配電事業や、風力などの再生可能エネルギー事業、原子力事業などは保有比率 50 対 50 の合弁会社による所有にした⁷⁴。

重電機器にとどまらず、各種エネルギー関連の事業ポートフォリオを保有しており、それらを組み合わせた巨大企業ならではのソリューションの提供を行っている。特に、ガスタービンそのものの技術リーダーシップをとることに主眼を置き、ガスタービン単品販売およびメンテナンスサービスの事業に専念、EPC を行わずに機器販売およびメンテナンスサービスに特化している。その結果、2015 年度、Power セグメント、Oil & Gas セグメントに関しては、売り上げの半分以上がサービスであり、安定的に高収益を稼げる企業体質を構築している。

（事例）世界最高効率のコンバインドサイクル発電所としてギネス世界記録に認定⁷⁵

米国の GE とフランスの EDF（フランス電力）は 2016 年 6 月 17 日、フランス北部のブシャンで GE 製のガスタービンを用いたコンバインドサイクル方式の「ブシャン火力発電所」が稼働を開始したと発表した。同発電所では送電端効率 62.22% を達成し、世界最高効率のコンバインドサイクル発電所としてギネス世界記録に認定されたという。GE の新型ガスタービン「9HA」を採用。

（3）事業の財務概況

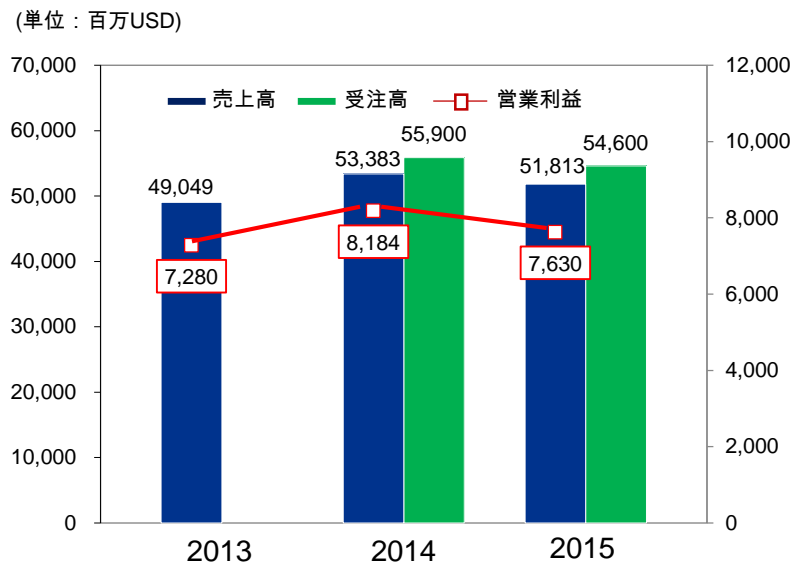
GE のジェフリー・イメルト CEO は、2015 年 7 月の 2015 年第 2 四半期決算説明にて、これまでの中核事業であった金融事業からの撤退を宣言し、前述のとおり 2015 年 11 月、Alstom 買収に伴う開示事業セグメントの変更など、製造業としての地位を確固とすべく財務体質の強化を進めている。

エネルギーセグメントとして、前述の 4 部門（Power、Renewable Energy、Oil & Gas、Energy Management）があり、下表が直近 3 カ年の売上高・利益・受注高の実績となる。

⁷⁴ <http://www.genewsroom.com/Press-Releases/GE-Announces-Energy-and-Transport-Alliance-with-Alstom-276252>

⁷⁵ <http://www.genewsroom.com/press-releases/ge-sets-guinness-world-records™-title-most-efficient-power-plant-283038>

図 18：GE エネルギーセグメントの売上高・利益・受注高の実績



(単位:百万 EUR)	2013			2014			2015		
	売上高	利益	受注高	売上高	利益	受注高	売上高	利益	受注高
Power	19,315	4,328	-	20,580	4,486	20,300	21,490	4,502	23,300
Renewable Energy	4,824	485	-	6,399	694	7,100	6,273	431	7,400
Oil & Gas	17,341	2,357	-	19,085	2,758	20,100	16,450	2,427	15,100
Energy Management	7,569	110	-	7,319	246	8,400	7,600	270	8,800
Energy Total	49,049	7,280	-	53,383	8,184	55,900	51,813	7,630	54,600

※2013年の受注高については非開示（Alstom 買収後に開示事業セグメントの変更があったため）

出典：GE, “Annual Report 2015”⁷⁶, “2015 Form 10K”⁷⁷を基に作成

(4) 事業の特徴

・事業ポートフォリオ再編および社内体制の構築

イメルトは会長兼 CEO に就任以前から、産業構造の急激な変化により競争が激化し、製品によって急速にコモディティ化（同質化）が進んできたことに危機感を覚えた。2001年就任以来、GE が得意とする分野に「選択と集中」を進めて強い事業をより強化するかたわら、コアでない事業は手放していった。そのポートフォリオの組み換えに 10 数年かけてきた。

⁷⁶ https://www.ge.com/ar2015/assets/pdf/GE_AR15.pdf

⁷⁷ https://www.ge.com/ar2015/assets/pdf/GE_2015_Form_10K.pdf

「選択と集中」の歴史（イメルト CEO 時代）

	【買収】*	【売却】
2002年	エンロン（風力発電事業、米）	—
2005	—	保険事業
2007	スミスエアロスペース（エンジニアリング、英）	プラスチック事業
2011	コンバーティーム（エネルギー関連、仏） ドレッサー（エネルギー産業向けインフラ、米） ウェルストリーム（油田サービス、英）	NBCユニバーサル（メディア&エンターティメント事業）
2014	ワールドテック（サイバーセキュリティ、加）	シンクロニー、ファイナンシャル（IPO）、家電事業
2015	Alstom（エネルギー産業向けインフラ、仏）	GEキャピタル（金融事業）

*：エネルギー関連事業に限定

出典：GE プレスリリースを基に作成

この選択と集中がすべて完了したことで、GE全体の利益は9割がインダストリアル部門で、キャピタル（金融）部門はわずか1割程度となり、GEの収益体質は大きく変わることになった。

また、部門や国の違いを超えて、横のつながりをもつことでシナジー効果が期待できる、この部門とこの部門をつなげればより高い成果が望めるということなどの横展開を推進するために、「GE デジタル」という GE で初めて部門間に横ぐしを通すための組織ができた。GE デジタル部門は、様々な事業・分野の専門家が混成した組織になっている。エンジン、電力、ヘルスケアなどという事業ごとのパーティカル（垂直）な組織ではなく、どの部署とも関連をもつホリゾンタル（水平）な組織である。また、GE ストアが顧客に対して部門横断的な付加価値を提供する中心的な役割を担っていく。例えば、電力事業の顧客に対して、GE パワー部門のタービンなどの発電機器だけでなく、エナジーコネクション事業のグリッド機器も提案するなど、共通の顧客に対して複数の部門が連携してひとつのソリューションを提案するためのハブとなる機能がある。

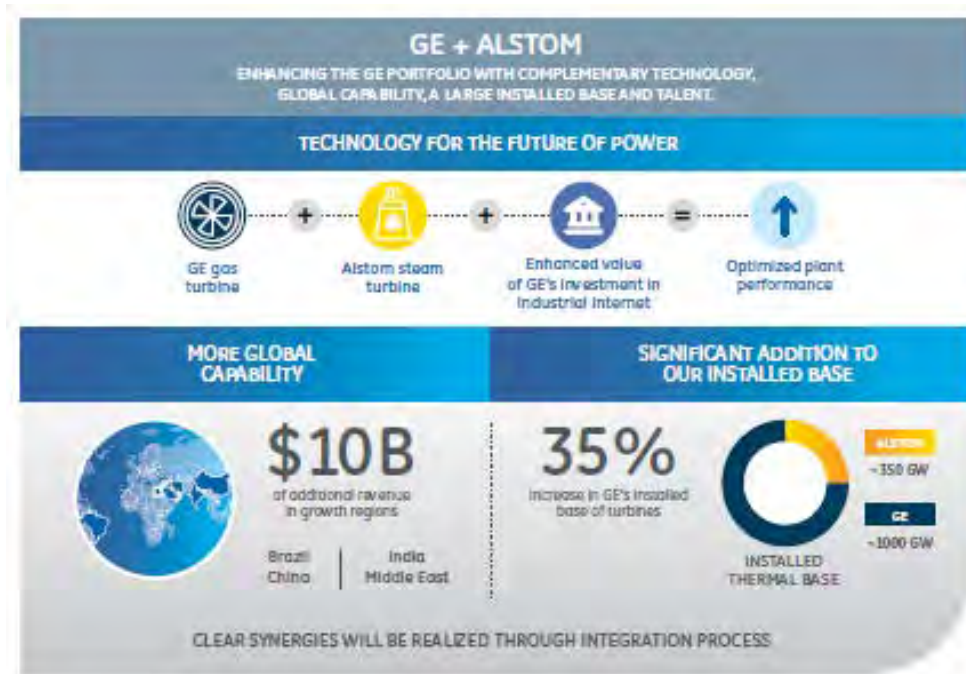
・ Alstom とのシナジー

2015年11月2日に完了した、仏 Alstom のエネルギー事業と送配電事業の買収は、GE 史上最大規模の買収であった。この戦略的な投資により、電力事業では補完的な製品とサービスの提供が可能になり、また送配電の分野における GE の立場をいっそう強固にするとしている。また、Alstom の持つ、アフリカ、中東などの顧客基盤への事業展開も可能となる。一方、Alstom は、テクノロジー、サービス、そして成長市場における GE の強みによる恩恵を享受している⁷⁸。今回の買収を通じて、GE のインストール・ベース（すでに設置された発電機器資産）の発電能力は約 1,500GW に拡大している。これは全米の供給量を十二分に賄える規模で

⁷⁸ GE, “Annual Report 2014” : https://www.ge.com/ar2014/assets/pdf/GE_AR14.pdf

ある。

図 19：GE・Alstom 提携の概要



出典：GE, “Annual Report 2014”⁷⁹

今後の具体的な事業内容として、Alstom のグローバルな発電・送配電事業と統合することで、GE はより大規模な発電能力に基づく保守やビッグデータ解析を手掛けられるようになる。これによって予期せぬダウンタイムの削減や、タービンや発電所、風力発電施設、送配電のパフォーマンスのより大きな向上を図れるようになった。

この買収により、GE は発電所の設計の改善や、送配電事業の飛躍的な拡大につなげることが可能となる。たとえば、Alstom はブラジルにある世界最長の送電システムの設備を供給してきた。その送電距離は 2,380km にわたり、5,000 本の鉄塔に張り巡らされた架空送電ケーブルは 2 万 km にも及んでいる。さらにこの買収は、広範で専門的な再生可能エネルギーの製品ポートフォリオの獲得にもつながった。GE は陸上風力発電でも市場を牽引するが、今後それを洋上へと広げることが可能になる。買収による相乗効果として、今後 5 年間で 30 億 USD のコスト削減を見込んでいる⁸⁰。

・「デジタル・インダストリアル・カンパニー」への変換

産業インフラ部門には、それぞれの業界に同じような製品をもつメーカーがあり、そうした競合相手より一歩先を行くには、より付加価値を高める必要がある。GE はこれまでテクノロジーを重視して大きな投資を行ってきたが、製品の技術競争だけでは明確な優位性を維持するのが難しい時代になってきている。IT カンパニーやソフトウェア・カンパニーはソフト単体で

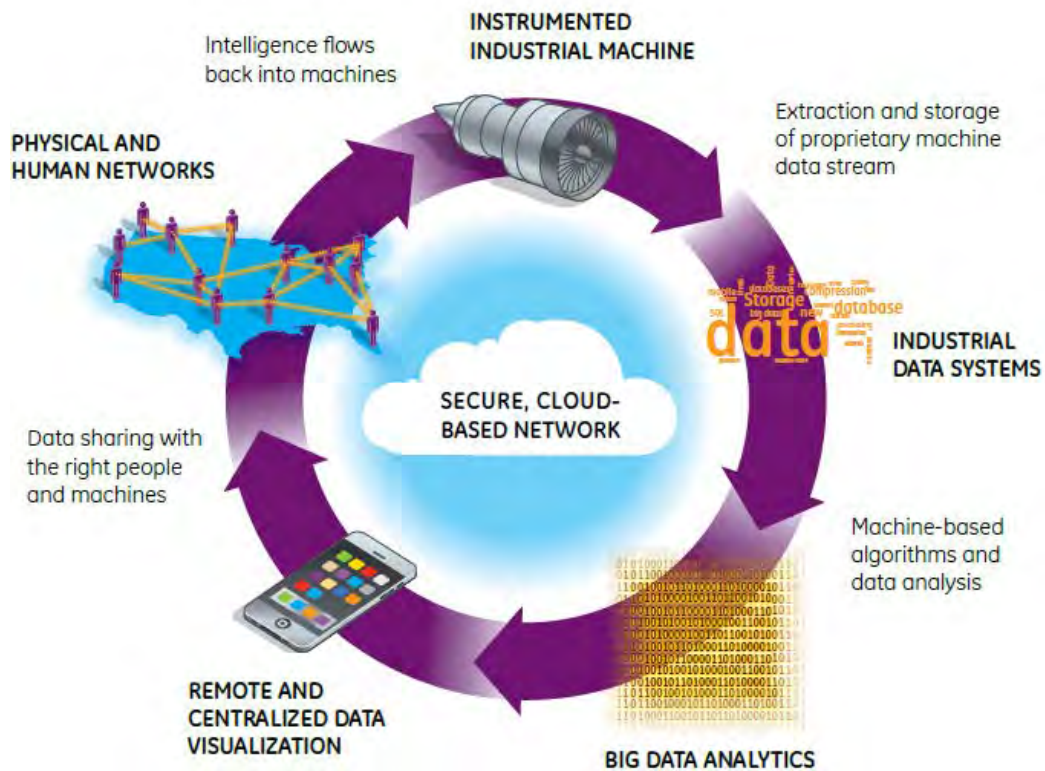
⁷⁹ https://www.ge.com/ar2014/assets/pdf/GE_AR14.pdf

⁸⁰ GE, “Annual Report 2015” : https://www.ge.com/ar2015/assets/pdf/GE_AR15.pdf

はなく、ハードウェアをより便利に効率的に使うためのソフトウェアも提供し始めており、付加価値の源泉はハードそのものより徐々にそちらに移りつつあり、そのため、GE はハードとソフトの両方を提供できる体制を目指している。

現在のマーケット動向を見て、これから最も必要とされるもの、最も付加価値として顧客に認められるものとして IoT を選択し、いままで培ってきたハードウェアのテクノロジーを提供するだけにとどまらず、そこから集めたビッグデータを分析し、それらの機器をより効率的に、より安全に運用できるソリューションを併せて提供できる「デジタル・インダストリアル・カンパニー」への変換という戦略をとることに至った。

図 20 : 「デジタル・インダストリアル・カンパニー」の概念図



出典：GE, “Industrial Internet : Pushing the Boundaries of Minds and Machines”⁸¹

「デジタル・インダストリアル・カンパニー」の3つの主軸として、GE は「インダストリアル・インターネット」「ブリリアント・ファクトリー」「グローバル・ブレイン」を置いている。このうち、「インダストリアル・インターネット」の取り組みとして、2011年にシリコンバレー（カリフォルニア州サンラモン）にソフトウェア専門の開発拠点「GE グローバル・ソフトウェアセンター」を新設し、1,200人のソフトウェア・エンジニアが働いている。「インダストリアル・インターネット」の実現には、プレディックス（PREDIX）というプラットフォームの存在が欠かせない。これは、産業用ソフトウェア・プラットフォームである。数

⁸¹ https://www.ge.com/docs/chapters/Industrial_Internet.pdf

多くのアプリケーションを産業用機器と接続し、データ収集や分析を行って、顧客にリアルタイムでソリューションを提供することで、その機器と性能や生産性向上につながられる。それを活用した「プレディックス・クラウド」というクラウドサービスも提供している⁸²。

多様な産業機器とインターネットを連動させることでリアルタイムに手に入るビッグデータを分析してソリューションを生み出す「インダストリアル・インターネット」の普及を進めるために、GEは産業機器向けサイバーセキュリティの強化にも乗り出した。そのため、製油所や発電所など大型産業施設をサイバー攻撃から防護するカナダのサイバーセキュリティ会社のワールドテック社を2014年に買収した。GEはワールドテックのノウハウを活用し、今後、様々な機器のサイバーセキュリティの標準的な評価指標となっている「アキレス認証制度」や組み込みシステム、産業設備向けに多重防護を提供する「オプシールド&スレッド・アップデート」など、総合的なサイバーセキュリティ対策ソリューションを提供している。

（「インダストリアル・インターネット」の事例）

ドイツのエネルギー大手エーオンの風力発電所⁸³：

大規模な風力発電では、風力発電用タービンをひとつところにまとめて建てることになる。ここには283本が立っており、同社にとって大きな投資になった。そのため、できるだけ効率化を図りたいという強いニーズがあった。GEが提供する風力発電用タービンの中にはセンサーが組み込まれており、それぞれ風を感じるようになっている。そのセンサーからの情報をもとに、そのときどきの風の強度や向きによって羽根の角度や向きを変えるシステムをつくった。風上にある風車と、風下の風車では風の当たり方が違ってくるが、センサー同士が連動して自動調整するソフトを組み込んだことによって、風力発電所全体の発電効率が4.1%向上した。

（「インダストリアル・インターネット」日本の事例）

東芝と産業用機器向けIoT分野で協業を図り、プレディックスを活用したパイロットプロジェクトを共同で開始するようになった⁸⁴。この技術の最大のニーズは、東芝が製造する様々な産業用機器のメンテナンスの効率化を図ることにある。当面は東芝製ビル設備を対象に、データ収集やその分析を行って、保守業務の効率化と予防保守の高度化を図る。

東京電力フェエル&パワーと、火力発電分野におけるIoTソリューションの共同開発・導入を進めることも決まった⁸⁵。これは、既設の発電設備にデジタル・ソリューションを導入する日本初の試みで、効率的な運用や信頼性の工場が期待される。まず宮津火力発電所4号系列（LNG燃料、50.7万kW x 3軸）とプレディックス上で稼働するアプリケーションを連動させることで、メンテナンスの最適化やライフサイクルコストの削減を目指す。

⁸² <https://www.ge.com/digital/>

⁸³ GE プレスリリース：

<http://www.genewsroom.com/press-releases/eon-achieves-more-output-469-wind-turbines-through-ge%E2%80%99s-wind-powerup-services-278733>

⁸⁴ 東芝 プレスリリース：https://www.toshiba.co.jp/about/press/2015_11/pr_j0402.htm

⁸⁵ 東京電力 プレスリリース：http://www.tepco.co.jp/fp/companies-ir/press-information/press/2016/1326051_8623.html

4.5.2. Siemens

(1) 基本情報

商号	Siemens AG (シーメンス、Siemens)
本社所在地	Wittelsbacherplatz 2 80333, Munich, Germany
上場年月 (上場証券取引所)	1999年8月 (フランクフルト証券取引所)
売上高	796億 EUR (2016/9期 連結)
総資産	1,257億 EUR (2016/9期 連結)
従業員数	351,000人 (2016/9期 連結)
代表者	Joe Kaeser (2013 - , Chief Executive Officer)
沿革	<p>1847年: ヴェルナー・シーメンスがシーメンスの前身、シーメンス・ウント・ハルスケ電信機製造会社をベルリンに設立</p> <p>1899年: Simens & Halske がドイツ証券取引所に上場</p> <p>1966年: Simens & Halske、Simens-Schuckertwerke、Simens-Reiniger-Werke が合併し、Simens AG として設立</p> <p>2004年: デンマーク Bonus Energy 社を買収し、風力発電部を設立 日立製作所と原子力部門を統合し、日立 GE ニュークリア・エナジーを設立</p> <p>2016年: スペイン Gamesa 社と風力発電機事業の統合で基本合意</p>

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDA より作成

(2) 事業の概要⁸⁶

GE と同様、コングロマリットで、重電機器に加え、各種自動化機器などの産業用機器、医療用電子機器、金融事業を手掛ける。

発電事業における製品別売上構成をみると、ガスタービンが6割、蒸気タービン・発電機が2割強、風力タービンとコンプレッサーを合わせて約1割となっている。また会社によると世界の発電量のうち、約20%は同社の機器を使用して発電されている。

成長が見込まれるガスタービンでは、会社によると先端エリアでは世界1位のシェアを持っているとされ、効率面でも GE 及び三菱重工業と競っている。欧州・北米だけでなく、中東・中国の売上高も大きく、今後20年間で見込まれる発電需要の増加のうち6割を会社が注力している地域として見込まれている。また、送電機器に関しては高電圧送電機器に強く、特に風力発電などで成長が期待される高圧直流送電機器も扱っており、ABB に次ぐ世界2位のシェアとみられる。

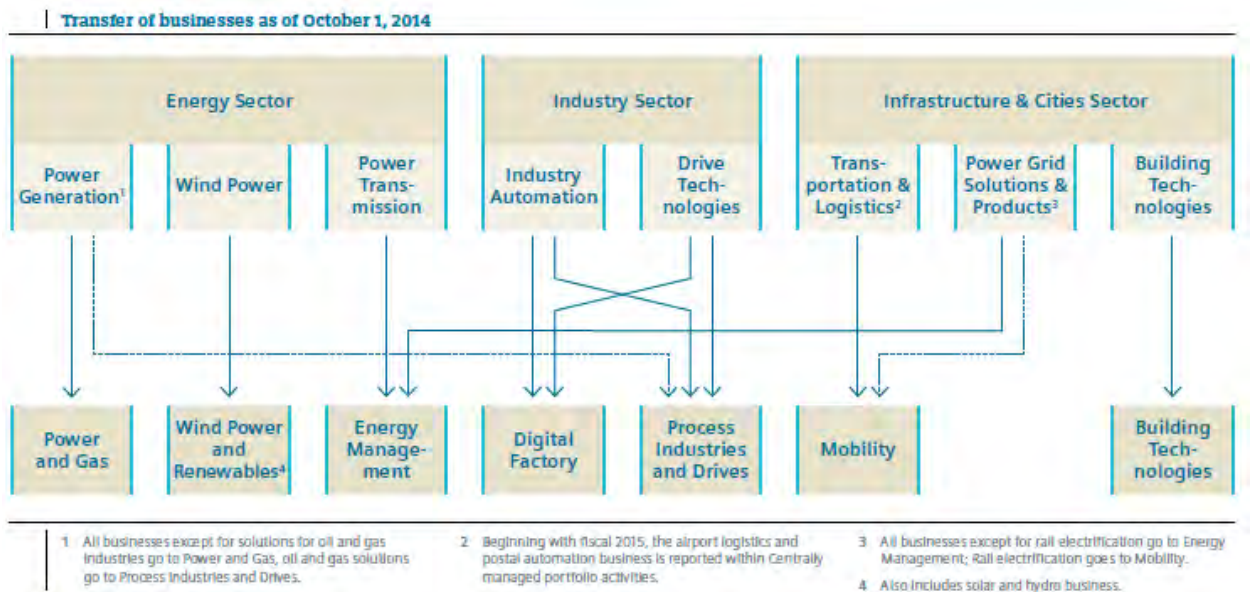
(3) 事業の財務概況

⁸⁶ Siemens ウェブサイトおよびプレスリリース：<https://www.siemens.com/global/en/home.html>

長期的視点から潜在的な成長可能性が高いと考えられる成長分野を含む、「電化（エレクトリフィケーション）」、「自動化（オートメーション）」、「デジタル化」の3領域に注力するため、2020年までの具体的な施策にあたる「Vision 2020」を発表⁸⁷。Vision 2020は、最新の電化、自動化のバリューチェーンに基づいたシーメンスの長期的展望に取り組むためのものとしている。

組織の再編として、2014年9月末以前までの従来の4つのセグメント（Energy、Healthcare、Industry、Infrastructure & Cities）から、2014年10月1日付にて事業セグメントを9つとした⁸⁸。下図表のとおり、従来のEnergyセグメントの発電事業、風力発電、送電事業がPower & Gas、Wind Power and Renewables、Energy Managementのそれぞれ3セグメントに分類され、Energy Managementには、従来、Infrastructure & Citiesセグメントで手掛けられていた配電事業も含まれる。Wind Power and Renewablesには、太陽光発電および水力発電事業も含まれ、その他の再生可能エネルギーを取り扱う。

図 21：Siemens 組織再編の概要図（2014年10月1日時点）



出典：Siemens AG, “Annual Report 2014”⁸⁹

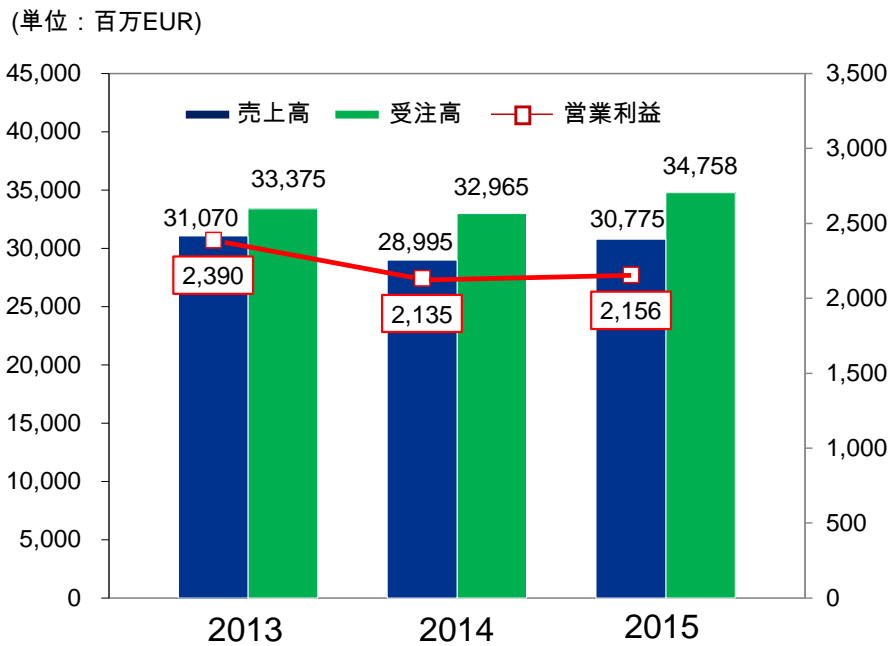
Energy Sectorの直近3カ年の売上高・営業利益・受注高について以下表に示す。売上高の約4割をそれぞれ占めるのは、Power and Gas、Energy ManagementであるがWind Power and Renewablesの売上高は順調に伸長しており、2015年には営業利益率で3%となり、今後、Energy Sector全体を牽引する事業となることが期待されている。

⁸⁷ http://www.siemens.co.jp/Japanese/Press/2014/press/Pages/press_20140507_vision2020.aspx

⁸⁸ 金融サービス事業は含まない。

⁸⁹ http://www.siemens.com/annual/14/en/download/pdf/Siemens_AR2014.pdf

図 22：Siemens Energy Sector の売上高・受注高・営業利益の推移



(単位:百万 EUR)	2013			2014			2015		
	売上高	利益	受注高	売上高	利益	受注高	売上高	利益	受注高
Power and Gas	14,016	2,129	15,100	12,720	2,215	13,996	13,193	1,426	15,666
Wind Power and Renewables	5,382	7	6,870	5,567	6	7,759	5,660	160	6,136
Energy Management	11,672	254	11,405	10,708	(86)	11,210	11,922	570	12,956
Energy Total	31,070	2,390	33,375	28,995	2,135	32,965	30,775	2,156	34,758

出典：Siemens, “Annual Report”⁹⁰を基に作成

下図表のとおり、2015年度より、新事業部門は利益率目標を割り当てられている。これは買収に関連する無形資産減価償却分を除いている。各事業部門の目標利益率の幅はそれぞれの主要な競合他社の利益率をベースとして算出している⁹¹。

⁹⁰ http://www.siemens.com/annual/10/download_center_en.html

⁹¹ http://www.siemens.co.jp/Japanese/Press/2014/press/Pages/press_20140507_vision2020.aspx

図 23 : Siemens 各事業部門の目標利益率

Profit margin ranges	
	Margin range
Power and Gas	11 – 15%
Wind Power and Renewables	5 – 8%
Energy Management	7 – 10%
Building Technologies	8 – 11%
Mobility	6 – 9%
Digital Factory	14 – 20%
Process Industries and Drives	8 – 12%
Healthcare	15 – 19%
SFS ((ROE) (after taxes))	15 – 20%

出典：Siemens AG, “Annual Report 2015”⁹²

(4) 事業の特徴

発電、送配電からスマートグリッドソリューションまでの機器のラインアップや技術の多様性、総合力を強化し強みとし、EPC（Engineering, Procurement, Construction）まで含め発電所全体の建設トータルでの受注を目指している。その際に他業種との提携も活用しており、Siemens が持つスマートグリッドの技術とコンサルティング企業 Accenture の IT 技術を融合し、次世代スマートグリッドサービスを提供する Omnetic 社を 2013 年 10 月に設立し、世界各地のスマートグリッド案件の獲得につなげるなどの戦略をとっている⁹³。

また、IoT の利活用も進めており、GE の Predix に相当するソフトウェアとして、産業機器が集めるビッグデータを分析するオープンクラウドプラットフォームである Cloud for Industry を開発し、顧客企業の利便性を高め、自社サービスや生産効率化に役立つソフトウェアなどの利用拡大につなげる計画である。

IoT 分野での IT ソフトウェア企業との提携として、2016 年 11 月に米 Microsoft との提携を発表した。Siemens の IoT プラットフォーム「MindSphere – Siemens Cloud for Industry」を Microsoft のクラウド「アジュール」で使えるようにする。MindSphere は機器のセンサーなどが集めるデータを分析し、世界中の工場で予測保守やエネルギー管理、投入資源の最適化などができる。設計などの応用ソフトも付加し顧客が自社仕様に使い方を変えることも可能としている。Siemens 自らクラウドで提供するが、アジュールで利用できるようにし顧客の広がりを円滑にする。Microsoft の機械学習の機能などとの連携も視野にいれている⁹⁴。

⁹² http://www.siemens.com/investor/pool/en/investor_relations/Siemens_AR2015.pdf

⁹³ Siemens プレスリリース：

<http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/smart-grid-world/news/Pages/-Siemens-and-Accenture-to-form-smart-grid-joint-venture.aspx>

⁹⁴ Siemens プレスリリース：

[http://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=en/pressrelease/2016/digitalfactory/pr2016110084dfen.htm&content\[\]=DF](http://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=en/pressrelease/2016/digitalfactory/pr2016110084dfen.htm&content[]=DF)

4.5.3. ABB

(1) 基本情報

商号	ABB LTD (アセア・ブラウン・ボベリ、ABB)
本社所在地	Affolternstrasse 44, CH-8050 Zurich Switzerland
上場年月 (上場証券取引所)	2001年5月 (ニューヨーク証券取引所)
売上高	355億USD (2015/12期 連結)
総資産	414億USD (2015/12期 連結)
従業員数	135,800人 (2015/12期 連結)
代表者	Ulrich Spiesshofer (2013 - , Chief Executive Officer)
沿革	1890年: スウェーデン・ストックホルムでアセア社が合併により設立 1891年: スイス・バーデンでブラウン・ボベリ社設立 1988年: 両社合併によりアセア・ブラウン・ボベリ (ABB) 社設立 1989年: アメリカ・ウェスティングハウス・エレクトリック社の変電、送配電部門を買収

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDA より作成

(2) 事業の概要⁹⁵

送変電機器と自動化機器事業を扱う。2014年12月期の売上高は、各種送変電機器を取り扱う Power Products セグメントが22%、送電・変電システムや変電所、発電機器の最適制御ソリューションなど機器単体以外を扱う Power Systems セグメントが16%、配電盤やスイッチなど末端で使用される低電圧機器を扱う Low Voltage Products セグメントが17%となっている。

Combustion Engineering (コンバッション・エンジニア、USA) を1990年に買収し、発電機器も手掛けていたが、経営危機に陥り、原子力発電事業は Westinghouse (ウェスティングハウス、USA、2005年以降は東芝の傘下) に、火力発電は Alstom にそれぞれ売却した。

同社は2012年に川下の低電圧機器を扱う Thomas & Betts (トーマスアンドベッツ、USA) を買収し、Thomas & Betts のもつ6,000社以上のディストリビュータへのネットワークを有している。また、全社ポートフォリオという観点でも、北米の売上が増加することによる地域分散と、景気遅行的な大型の高電圧送変電機器に加えて、低電圧機器は景気と比較的一致する傾向があり、景気循環に対する平準化という効果も見込んでいる。2010年にはエネルギー管理ソフトを扱う Ventyx (ベンティクス、USA) を買収しており、スマートグリッド領域では情報化が重要でその対応に早期から取り掛かっている。また、2014年12月には、日立製作所と高圧直流送電事業で日本に合弁会社を設立することで合意し、2015年11月より営業を開始している。

⁹⁵ ABB ウェブサイトおよびプレスリリース：<http://new.abb.com/>

(3) 事業の財務概況

直近の ABB 社全セグメントの売上高および事業活動からの利益について以下の表のとおりである。Low Voltage Products セグメント、Power Products セグメントおよび Power Systems セグメントの売上高、利益ともに当社の事業全体の大きな割合を占めているとがわかる。

表 6：ABB セグメント別売上高・事業活動からの利益

Revenues

(\$ in millions)	2013	2014	2015
Discrete Automation and Motion	9,915	10,142	9,127
Low Voltage Products	7,729	7,532	6,547
Process Automation	8,497	7,948	6,374
Power Products	11,032	10,333	9,550
Power Systems	8,375	7,020	6,342
Operating divisions	45,548	42,975	37,940
Corporate and Other	(3,700)	(3,145)	(2,459)
Total	41,848	39,830	35,481

Income from operations

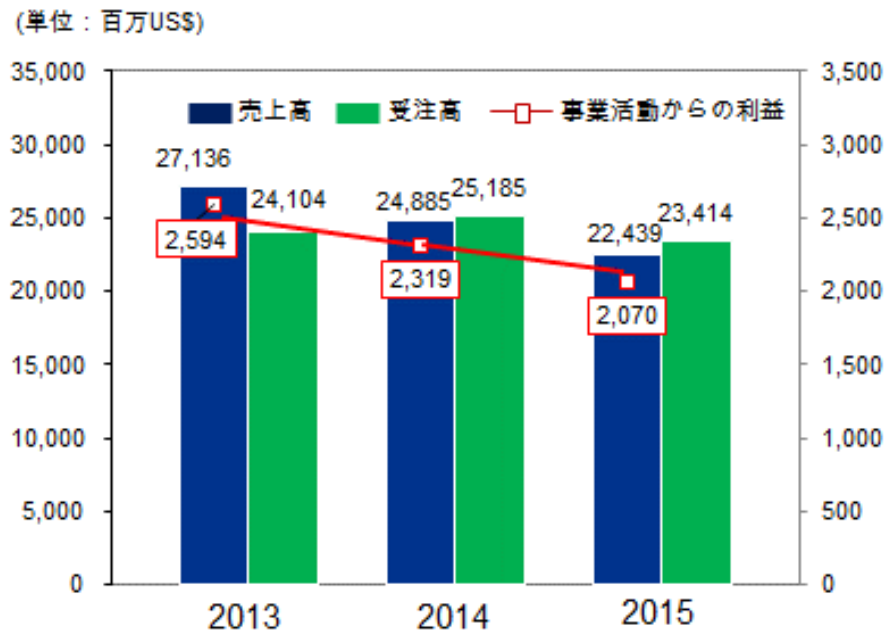
(\$ in millions)	2013	2014	2015
Discrete Automation and Motion	1,458	1,422	991
Low Voltage Products	1,092	1,475	909
Process Automation	990	1,003	593
Power Products	1,331	1,204	1,051
Power Systems	171	(360)	110
Operating divisions	5,042	4,744	3,654
Corporate and Other	(650)	(569)	(610)
Intersegment elimination	(5)	3	5
Total	4,387	4,178	3,049

出典：ABB, “Annual Report”⁹⁶を基に作成

Low Voltage Products セグメント、Power Products セグメントおよび Power Systems セグメント合計の売上高、受注高、事業活動からの利益の推移については以下図表のとおりである。

⁹⁶ <http://new.abb.com/docs/default-source/investor-center-docs/annual-report/annual-report-2015/abb-group-annual-report-2015-english.pdf>

図 24：ABB 売上高、受注高、事業活動からの利益の推移



出典：ABB, “Annual Report”⁹⁷を基に作成

(4) 事業の特徴

- ・送配電技術に強み

ABB 社は、60 年前に高圧直流送電（High Voltage Direct Current：HVDC）技術⁹⁸を開発し、常に革新の最先端を担ってきている。世界中の HVDC 設備の約半数に携わり、HVDC のすべての主要機器を自社で開発、製造する能力を持つことで、この業界のリーダーとしての地位を築いている⁹⁹。

4.5.4. 東芝

- (1) 基本情報（本章 4.5.4 を参照）

- (2) 事業の概要¹⁰⁰

火力発電においては、GE との連携を中心に、国内外で受注を拡大させている。同社は多様で高度な市場のニーズを満たすため、高効率化とより優れた環境性能向上への取組みを重点施策とし、世界最高効率であるコンバインドサイクルプラント、世界で最も高度な蒸気条件を持

⁹⁷ <http://new.abb.com/docs/default-source/investor-center-docs/annual-report/annual-report-2015/abb-group-annual-report-2015-english.pdf>

⁹⁸ HVDC とは、二つの電力系統間で送電するためのシステム。送電側の電力を、交流から直流に変換した上で送電し、受電側の系統では交流に戻して電力を使用する。電気的な損失や設置面積、建設コストを低くすることができるため、長距離送電の用途に最適であり、また、周波数が異なり直接交流で接続できない系統の連系にも適している。

⁹⁹ <http://www.abb.co.jp/cawp/seitp202/61f00de50a63d283c1257db0000b60dd.aspx>

¹⁰⁰ 東芝 ウェブサイトおよびプレスリリース：http://www.toshiba.co.jp/index_j3.htm

つ石炭焚き高効率 A-USC 発電、CCS 設備など、様々な機器やサービスを提供している。2011 年度にはスマートメーターの大手であるスイスの Landis & Gyr Holding AG を買収する¹⁰¹など、エネルギーシステム全体でのサービス提供の海外展開を加速させてきた。

しかしながら、同社は不適切会計問題を指摘され、2015 年 7 月には第三者委員会による会計処理の適切性に関する調査報告書が提出されたほか、原子力発電事業の傘下の Westinghouse について 2012-2013 年度中に約 1,600 億円の減損処理を行っていたことが発覚しており、現在は事業構造全体の見直し中となっている。

(3) 事業の財務概況

事業の種類別セグメントは、製品の性質、製造方法及び販売市場等の類似性にに基づき、「電力・社会インフラ」、「コミュニティ・ソリューション」、「電子デバイス」、「ライフスタイル」及び「その他」の 5 部門としており、エネルギー事業については、「電力・社会インフラ」が取り扱う。「電力・社会インフラ」の分野別の売上高について、「原子力」、「火力・水力」、「送変電・配電・太陽光」は以下表に示す。

表 7：東芝エネルギー事業の売上高（単位：億円）

	2014 年	2015 年
原子力	6,178	7,275
火力・水力	3,208	3,342
送変電・配電・太陽光	3,832	3,427
計	13,218	14,044

出典：東芝 ”IR 資料（2016 年 5 月 23 日）”¹⁰²を基に作成

なお、2016 年 4 月 1 日付の組織変更による事業グループ体制の見直しに伴い、2016 年度より事業の種類別セグメントを「エネルギーシステムソリューション社」、「インフラシステムソリューション社」、「ストレージ&デバイスソリューション社」、「インダストリアル ICT ソリューション社」及び他 3 事業グループの計 6 部門に変更され、エネルギー事業については、「エネルギーシステムソリューション社」が取り扱う¹⁰³。

(4) 事業の特徴

1927 年に初号機を出荷して以降、多くの発電用タービン・発電機を製造し、その累計は 1900 台超に上る。また、電力需要の拡大に対応し求められる火力発電プラントの大型化・高性能化に対し、より高い発電効率を実現できるコンバインドサイクル発電プラントにおいても、ガスタービンで多くの実績を持つ GE と提携し、プラントの建設に携わっている。

¹⁰¹ https://www.toshiba.co.jp/about/press/2011_07/pr_j2501.htm

¹⁰² http://www.toshiba.co.jp/about/ir/jp/library/er/er2015/q4/ter2015q4_ca.pdf

¹⁰³ https://www.toshiba.co.jp/about/or_j.pdf

4.5.5. 日立製作所

(1) 基本情報

商号	株式会社日立製作所（英訳名：Hitachi, Ltd）
本社所在地	東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
上場年月（上場証券取引所）	1949年5月（東京証券取引所）
売上高	10.0兆JPY（2016/3期 連結）
総資産	12.6兆JPY（2016/3期 連結）
従業員数	313,832人（2016/9期 連結）, 37,353人（2016/3期 単体）
代表者	東原 敏昭（2016 - 代表執行役 執行役社長兼 CEO）
沿革	1910年：久原鋳業所で日立鋳山付属の修理工場として発足 1920年：日立・亀戸の両工場を擁し、株式会社日立製作所として独立 1970年：世界初の列車運行管理システム「新幹線運行管理システム」の開発に成功 2011年：三菱重工業、三菱電機と水力発電事業統合、日立三菱水力株式会社設立

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDA より作成

(2) 事業の概要¹⁰⁴

総合電機と重電では国内首位の事業規模である。都度セグメント変更を行っており、重電機器が含まれるセグメントは2008年度までは電力・産業システム、2014年度までは電力システムであった。2015年度については社会・産業システムに含め、事業グループとしては電力・インフラシステムグループを構成している。

今後、ITプラットフォーム事業や電力流通事業など、市場環境の変化を取り込んだ事業構造改革を進め、グローバル展開とサービス事業の拡大による収益安定化を図り、キャッシュ創出力を強化する方針である。

2015年6月には、ABBと国内向け高圧直流送電事業に関する合弁会社日立 ABB HVDC テクノロジーズの設立について正式契約を締結し、同年10月には営業を開始させた¹⁰⁵。

(3) 事業の財務概況

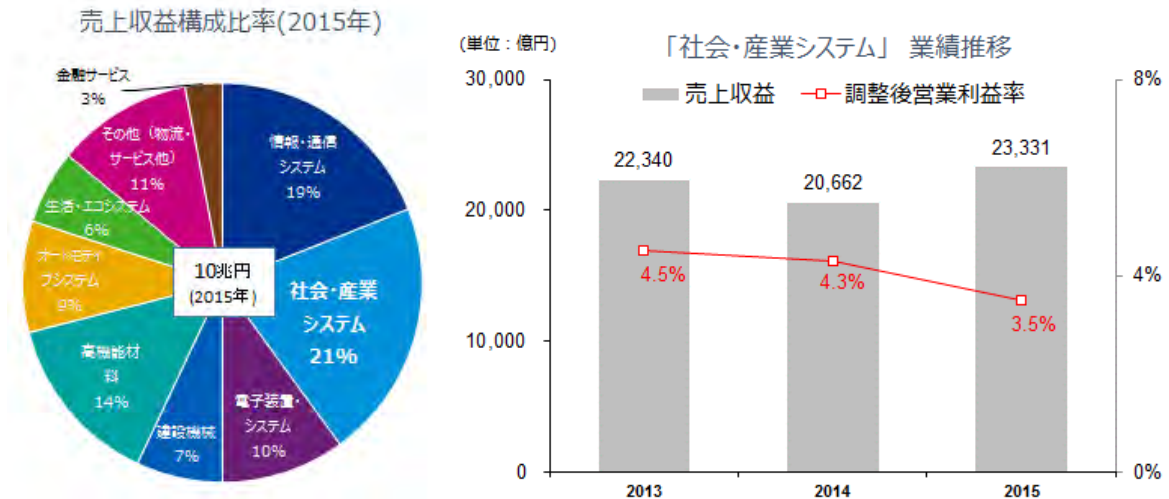
2016年3月31日以前まで、製品別カンパニー制を採用しており、事業セグメントとしては、「情報・通信システム」、「社会・産業システム」、「電子装置・システム」、「建設機械」、「高機能材料」、「オートモティブシステム」、「生活・エコシステム」、「その他（物流・サービス他）」、「金融サービス」で区分している。エネルギー分野の事業として、「社会・産業システム」の中に「産業用機器・プラント」「火力発電システム」「原子力発電システム」「自然エネルギー発電

¹⁰⁴ 日立製作所 ウェブサイトおよびプレスリリース：<http://www.hitachi.co.jp/>

¹⁰⁵ 日立製作所 プレスリリース：<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2015/10/1015a.html>

システム」「電力流通システム」があり、「社会・産業システム」の売上収益に占める構成比率は21%を占め、2015年の調整後営業利益率は3.5%であった。

図 25：日立製作所 セグメント売上収益構成比率（2015年）、「社会・産業システム」業績推移



出典：日立製作所, “アニュアルレポート 2015”¹⁰⁶を基に作成

2016年4月1日付で、顧客との「協創」を加速するフロント機能を強化した事業体制を構築するため、顧客のそばでイノベーションをサービスとして提供するサービス主体の事業群と、製品、部品、材料などを提供するプロダクト主体の事業群で構成される新しい事業体制へ移行した。サービス主体の事業群では、①電力・エネルギー、②産業・水、③アーバン、④金融・公共・ヘルスケアの4つのマーケットに、営業やエンジニアリング、コンサルティングなどのフロント機能を強化した12のフロントビジネスユニットを設立した。

図 26：日立製作所の新たな事業体制

4つの分野	12のフロントビジネスユニット
①電力・エネルギー	原子力、電力、エネルギーソリューション
②産業・水	産業・流通、水
③アーバン	ビルシステム、鉄道、アーバンソリューション、ディフェンス
④金融・公共・ヘルスケア	金融、公共、ヘルスケア

出典：日立製作所プレスリリース¹⁰⁷

¹⁰⁶ <http://www.hitachi.co.jp/IR/library/integrated/2016/ar2016j.pdf>

¹⁰⁷ <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2016/02/0203a.html>

また、2016年5月18日に社会イノベーション事業を軸にIoT時代のイノベーションパートナーを目指す、2018年度を最終年度とする「2018中期経営計画」を発表し、2015年度を基準年とする2018年度に向けての事業戦略が各事業毎に策定された¹⁰⁸。

電力・エネルギー事業は、2015年度売上高が5,195億円であり、このうち高効率火力発電設備を含むガスエンジン、変圧器、ガス絶縁開閉装置、太陽光発電システムや風力発電システムなど電力ビジネスユニットが57%、原子力ビジネスユニットが36%、監視制御システムや広域系統安定化システムなどエネルギーソリューションビジネスユニットが7%を占める。また、電力ビジネスユニットでみると、2015年度売上高は2,705億円、2016年度見通しは2,750億円と横ばい、2018年度目標は3,200億円となる。基本戦略として電力ビジネスユニットでは、サービス事業のIoT化で高付加価値を目指すほか、発電ソリューション事業の強化、送変電システム事業の拡大を図ろうとしている¹⁰⁹。今後の市場戦略としては、サービス事業として自然エネルギー発電システムのIoT化を進めるほか、「まるごと保守サービス」を拡大して高付加価値サービスを拡大する。発電ソリューションでは電源ラインアップを強化、バイオガス発電システムも揃える。高効率火力案件における取組としては、三菱日立パワーシステムズ(株)と連携し、設備の残作業や試運転の着実な遂行や運転開始時期遅延などの補償に関する顧客交渉の早期収束など発生費用のミニマム化を推進するとしている。

4.5.6. MHPS

(1) 基本情報

商号	三菱日立パワーシステムズ株式会社 (英訳名：Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd)
本社所在地	横浜市西区みなとみらい3-3-1 三菱重工横浜ビル
上場年月(上場証券取引所)	非上場
売上高	7,987億JPY(2016/3期 単体)
総資産	1兆1,235億JPY(2016/3期 単体)
従業員数	11,195人(2016/03期 単体)
代表者	安藤 健司(取締役社長)
沿革	2014年：三菱重工株式会社、株式会社日立製作所が出資して設立

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDAより作成

¹⁰⁸ 日立製作所プレスリリース：<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2016/06/0601.html>

¹⁰⁹ 日立製作所, “電力・エネルギー事業戦略2016年6月1日”:

http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2016/06/0601/20160601_02_pande_presentation.pdf

(2) 事業の概要^{110 111}

2014年2月に三菱重工業と日立製作所の火力発電システム分野を統合して発足した。GTCC、IGCC、ボイラ・タービン発電プラント、地熱発電プラント、ガスタービン、蒸気タービン、ボイラ、発電機、発電プラント周辺機器を製造している。

日立製作所が強みをもつ中小型ガスタービンなどを取り込むことにより、ほぼすべての発電方式に対応できる製品ラインナップを備え、また各種プラント事業等で培ったエンジニアリング力を武器に、両社のシナジー効果を最大限に発現するビジネスモデルを構築している。

図 27：ビジネスモデルの例（火力発電システム）



出典：三菱重工業, "Annual Report 2015"¹¹²

世界中に製造・販売拠点を有し、世界の様々な地域でタービン発電機の納入や火力発電システムプロジェクトをまとめ上げる総合エンジニアリングサービス事業を展開している。

4.5.7. 三菱電機

(1) 基本情報

商号	三菱電機株式会社（英訳名：Mitsubishi Electric Corporation）
本社所在地	東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
上場年月（上場証券取引所）	1949年5月（東京証券取引所）
売上高	4.4兆JPY（2016/3期 連結）
総資産	4.1兆JPY（2016/3期 連結）
従業員数	135,160人（2016/3期 連結）, 33,321人（2016/3期 単体）
代表者	柵山 正樹（2014 - 代表執行役執行役社長取締役）
沿革	1921年：三菱造船（株）電機製作所を母体に三菱電機（株）を設立 1924年：2300kVA 立軸形水車発電機を初めて製作 2008年：宇宙通信の国産初国内商用通信衛星（次期通信衛星）「スーパーバード7号機（C2号機）」の打ち上

¹¹⁰ MHPS ウェブサイトおよびプレスリリース：<https://www.mhps.com/>

¹¹¹ 三菱重工業 ウェブサイトおよびプレスリリース：<https://www.mhi.co.jp/>

¹¹² https://www.mhi.co.jp/finance/library/annual/pdf/report_2015_16.pdf

げに成功

2011年：三菱重工業、三菱電機と水力発電事業統合、日立三菱水力株式会社設立

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDA より作成

(2) 事業の概要¹¹³

日本の大手総合電機メーカーとして、「重電システム」、「産業メカトロニクス」、「情報通信システム」、「電子デバイス」、「家庭電器」、「その他」の6セグメントに関係する事業を行っており、家電から重電、人工衛星まであらゆる製品を販売している。FA 機器、昇降機（エレベーターなど）、タービン発電機、鉄道車両用電機品、パワー半導体、人工衛星など多くの産業用電気機器で日本国内トップシェアであり、宇宙・防衛分野にも強みを持つ。

「重電システム」の発電プラント事業において、タービン発電機、水車発電機、発電プラント計装制御システム、原子力プラント用電機品といった様々な発電システムを独自または共同で開発している。各電力会社向けの他、各重工業、製紙会社向け、日本・海外製鉄会社向け、開発途上国の発電プラントシステムも設計開発製造している。当発電システムに関わっている部門のうち、回転機部門は1999年ティーエムエイエレクトリック株式会社として、さらに2003年にはパワーエレクトロニクス部門と東芝 GE オートメーションシステムズ株式会社¹¹⁴が合併により追加され、東芝三菱電機産業システム（TMEIC）を設立し、一部の設計開発製造を移行した。

三菱電機のタービン発電機の歴史は、1908年に長崎の三菱造船所に同所中央発電所用として2極625kVAを製造したことから始まっており、以来、世界各地に2,000台以上のタービン発電機を納入してきた。時代の要請にあわせ、発電機の大容量化およびタービン発電機の高効率化に係る技術開発を実現してきた。

ガスタービンを利用した熱効率の高い複合型発電方式（GTCC）の利用が世界的に拡大し、大容量で高効率な水素間接冷却機の開発が本格化され、2014年12月、水素間接冷却方式¹¹⁵の火力発電所向けタービン発電機の新製品である「VP-X シリーズ」の検証試験が完了した。水素間接冷却方式としては、世界で初めて900MVA級大容量発電機への適用を実現した¹¹⁶。

(3) 事業の財務概況

「重電システム」の2015年度の売上高比は25%であり、12,646億円の売上高、503億円の営業利益であった。

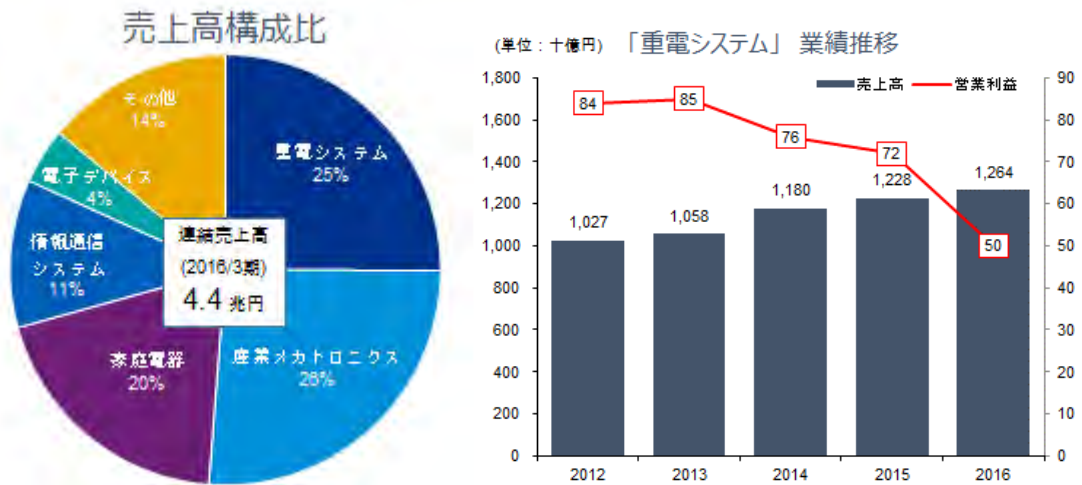
¹¹³ 三菱電機 ウェブサイトおよびプレスリリース：<http://www.mitsubishielectric.co.jp/>

¹¹⁴ 2000年、東芝とGEとの合併で産業プラントシステムの販売・エンジニアリングを行う会社として設立。

¹¹⁵ 水素間接冷却方式：熱を発生する固定子コイルに対し、コイルを覆う絶縁を水素ガスで冷却することで間接的にコイルを冷却する方式

¹¹⁶ 三菱電機プレスリリース：<http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2014/1208.html>

図 28：三菱電機 セグメント売上高構成比率、「重電システム」業績推移



出典：三菱電機, ”アニュアルレポート 2016年3月期”¹¹⁷を基に作成

同社は、創業100周年を迎える2020年度までに連結売上高5兆円、営業利益率8%以上を達成させる新たな成長戦略も打ち出した。「重電システム」の売上高構成比は29%、営業利益率8%以上を目指している¹¹⁸。

4.6 競合他社と日本企業との比較

欧米企業の強みとして、以下が挙げられる。

<機器単体ではなく、川上から川下までシステム全体での販売>

GE、Siemensなどコングロマリット企業は、他セグメントとの垂直的な事業運営と横串にさすIoT技術などのサービスの利活用を進めている¹¹⁹。

<財務基盤が強固>

日本企業は電力システムで必要とされる機器を全て提供している。しかし、世界的プレイヤーと比較して自国以外での売上高は低い。経済産業省の資料¹²⁰によると、日系企業の世界シェアはガスタービンで約1割、送配電機器も数%台となっている。この背景として、日本の電力事業者の設備投資が、1993年のピークから2000年代前半には3分の1まで減少したこと、また本業界の事業エリアで日本以外のプレイヤーが積極的に買収を行う一方で大きな買収を行わなかったことなどが挙げられる。2014年2月には三菱重工業と日立製作所が火力発電分野を中心に事業統合するなど、変化の兆しは見えるものの、世界の主要プレイヤーと比較して規模の

¹¹⁷ http://mitsubishielectric.co.jp/ir/data/annual_report/pdf/2016/annual2016_jp.pdf

¹¹⁸ 三菱電機, “三菱電機の経営戦略 2016年11月”:

http://www.mitsubishielectric.co.jp/ir/data/management_report/pdf/1611.pdf

¹¹⁹ 経済産業省, “平成27年度エネルギー需給緩和型インフラ・システム普及等促進事業(インフラシステム輸出に係る競争力強化等に向けた調査事業)” : http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2016fy/000112.pdf

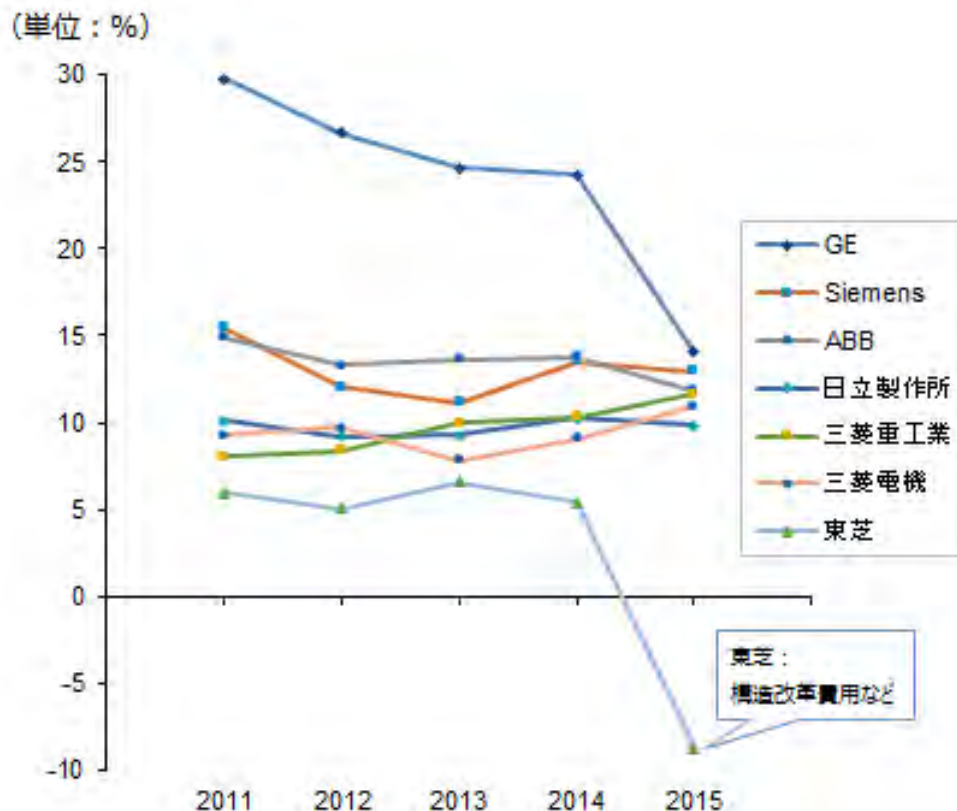
¹²⁰ http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/energy_system/pdf/002_03_00.pdf

差は大きい。

また、儲けの部分についても日本企業は世界的プレイヤーの後塵を拝している。本業の収益性を見る指標として EBITDA がある。EBITDA は、償却費の計算方法（定率法や定額法）や税等の影響を受けない利益なので各国の会計ルールや税制に左右されにくく、国際企業間で比較検討する際に有用である。また設備投資額の大きな当該重機メーカー6社について、本業の収益性を見る営業利益よりも、経年比較して安定して成長しているかどうかを見る場合には、設備投資による減価償却費の影響を排除した EBITDA は適当な指標である。

下記図表のとおり、直近5カ年の海外企業（GE、Siemens、ABB）の EBITDA マージンの平均は、10%を超えており安定的な収益性を確保していることがわかる。一方で、日立製作所、三菱重工業の EBITDA マージンは5カ年で安定的に推移はしているものの、10%弱と海外企業に比べると見劣りする。東芝に関しては、2015年に不適切会計の影響により、当該年度は利益を計上できなかったが、2015年以前についても約5%の EBITDA マージンで推移しており、収益性は低い。

図 29：EBITDA マージン推移



※EBITDA = 営業利益 + 減価償却費、EBITDA マージン = EBITDA ÷ 売上

出典：各社 Annual Report および SPEEDA を基に作成

<揺るぎのない企業ビジョンに裏付けられた事業戦略の遂行>

GE の事業の根幹には、常に産業インフラ機器を中心に製造するインダストリアル部門がコ

アとして存在している。その一番強い分野に集中し、さらに強化して進んでいくという方向を選んできたGEには、世界の社会的課題を解決していくというビジョンがあり、創業の原点であり、強みを活かした事業活動を行っている。その結果として、産業インフラ部門への選択と集中を行ってきており、同時に、そのビジョンに沿わない事業は、どんなに収益が高かろうと切り離していくことを決断してきた。

同じ重電業界でも、GEの利益率が日本の同業他社より高いのは、事業集中の効果によるものだととらえられる。日本企業が利益率の低い事業を抱えるのは、祖業であるとかトップの思い入れが強いなど様々な事情があると考えられるが、その点GEは、事業売却にあたってそうした事情をすべて捨て去って決断をしてきた。それができるのは、ビジョンが明確だからであると考えられる。

日本が強みをもつ技術 USC,A-USC の海外市場への導入可能性

石炭火力発電プラントを手掛ける世界の5大重電メーカーのうち、3社は日本企業であり、途上国の高効率化進展により、近年の日本メーカーの受注は好調である。世界の石炭火力設備容量は今後も増加する見込みであり、石炭火力それ自体が成長産業となりうる。日本企業には、USC石炭火力発電所の15年を超える運転実績があり、運転管理技術も日本が世界最高水準である、この強みを活かし、途上国への日本の技術導入を目指すということが考えられる。

表：2010年以降の日本メーカーの高効率石炭火力の海外受注実績（2016年5月現在）

	種別	案件数	(基数)	設備出力 (合計)	導入国
MHPS	超々臨界圧	7	(10)	7,026	韓国、モロッコ、インド、フィリピン、インドネシア
日立製作所	超々臨界圧	11	(19)	15,090	韓国、ポーランド、インド、マレーシア
	超臨界圧	1	(1)	650	ギリシャ
三菱重工業	超々臨界圧	7	(17)	13,080	韓国、インドネシア、台湾、インド
	超臨界圧	1	(1)	815	インドネシア
東芝	超々臨界圧	8	(14)	10,780	韓国、インド、ベトナム、インドネシア
	超臨界圧	3	(4)	2,323	インド、ベトナム、インドネシア
東芝 / IHI	超々臨界圧	2	(4)	3,600	台湾、マレーシア
IHI	超臨界圧	2	(3)	2,315	米国、インドネシア
IHI / MHPS	超々臨界圧	1	(2)	1,386	モロッコ
合計		43	(75)	57,065	

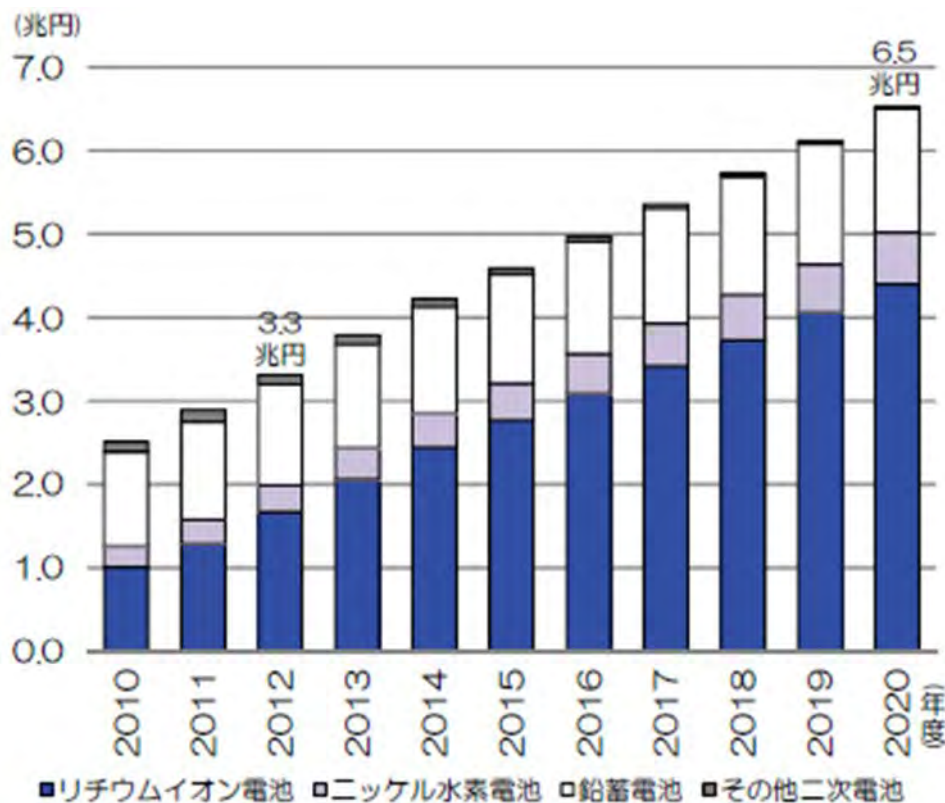
出典：各社のプレスリリースを基に作成

5. 蓄電池

5.1 市場規模

世界における蓄電池産業の市場規模は、2012年度時点で3.3兆円、2020年度には約2倍の6.5兆円に拡大すると予測されている。内訳として、特にリチウムイオン電池が2012年度の約1.7兆円から、2020年度の4.4兆円程度まで拡大するとされている。

図 30：蓄電池産業の世界市場見通し



出典：日本政策投資銀行，“蓄電池産業の現状と発展に向けた考察”¹²¹

蓄電池産業では、リチウムイオン電池が大きな割合（2012年度で市場シェアの45%）を占める。リチウムイオン電池市場では、大型分野を中心に市場規模が拡大する一方、小型分野では中国や韓国等の新興国勢が急速に勢力をつけ、日本勢がシェアを落としている。

¹²¹ http://www.dbj.jp/pdf/investigate/area/kansai/pdf_all/kansai1303_01.pdf

表 8：リチウム電池市場の市場シェア

順位	2008年（8,740億円）		2012年（13,600億円）	
	企業名	シェア	企業名	シェア
1位	三洋電機	33.6%	パナソニック※	23.8%
2位	ソニー	15.7	サムスン SDI（韓国）	22.6
3位	サムスン SDI（韓国）	14.8	LG 化学（韓国）	9.7
4位	パナソニック	8.8	ソニー	9.5
5位	比亞迪汽車（BYD）（中国）	8.1	BYD（中国）	6.5
6位	LG 化学（韓国）	7.6	BYK（中国）	1.9

※2009年12月にパナソニックは三洋電機を子会社化している。

出典：日本政策投資銀行, “バッテリーベイの現状と今後”¹²²

5.2 蓄電池種類別の主なプレイヤー

蓄電池には用途・種別ごとに技術開発が進められており、多様な企業がプレイヤーとして市場に参入している。

¹²² http://www.dbj.jp/pdf/investigate/area/kansai/pdf_all/kansai1307_01.pdf

表9：蓄電池の種類および各市場規模

	種類	市場規模 (2012年)	主要国内 メーカー	エネルギー密度 (カッコ内 理論値)	主要な 正極 材料	主要な 負極 材料	特徴	用途
上市済	鉛蓄電池	1兆 2,050億円	GSユアサ、古河電池、パナソニック、新神戸電機	40Wh/kg (167Wh/kg)	二酸化鉛	鉛	コストが安い、長年の実績がある、エネルギー密度が低いいため、容量を増やすと重くなる	車載用電池（起動用）、産業機器用電池
	ニカド電池	480億円	パナソニック、ソニー、東芝、GSユアサ	60Wh/kg	水酸化ニッケル	水酸化カドミウム	出力が大きい、エネルギー密度が低い、カドミウムを使用	民生用※減少傾向
	ニッケル水素電池	3,230億円	パナソニック、川崎重工業、FDK	100Wh/kg (196Wh/kg)	水酸化ニッケル	水素吸蔵合金	ニカド電池より安全性が高い	民生用電池※減少傾向、車載用電池、産業機器用電池
	リチウムイオン電池	1兆 6,700億円	パナソニック、ソニー、GSユアサ、日立グループ、東芝	200Wh/kg (583Wh/kg)	遷移金属酸化物	黒鉛系炭素材料	エネルギー密度が高いため、少量で高容量が可能、出力も大きい、小型民生用は技術的に成熟	民生用電池、定置用蓄電池、車載用電池、産業機器用電池
	NAS電池	不明（数百億円規模）	日本ガイシ、東京電力	130Wh/kg (786Wh/kg)	硫黄	ナトリウム	コストが安い、コンパクトで長寿命（15年）、運転に高温維持（300℃）が必要、ナトリウムの可能性が高い	定置用蓄電池（系統安定化用）
開発中	全固体電池	未発売	トヨタ自動車、出光興産、NTT、サムスン横浜研究所	～500Wh/kg (1,000Wh/kg)	遷移金属酸化物	黒鉛系炭素材料	リチウムイオン電池の電解質が固体であり、高安全性・高容量・長寿命化が可能	車載用電池、定置用蓄電池
	レドックスフロー電池	未発売	住友電気工業	～10Wh/kg (103Wh/kg)	バナジウム（4価）	バナジウム（3価）	エネルギー密度が低い、構造が単純で大型化しやすい	定置用蓄電池（系統安定化用）
	ナトリウムイオン電池	未発売	トヨタ自動車、住友電気工業、住友化学	(340Wh/kg)	遷移金属酸化物、セラミックス	黒鉛系炭素材料	資源量が豊富であり、コストが極めて安い	車載用電池、定置用蓄電池

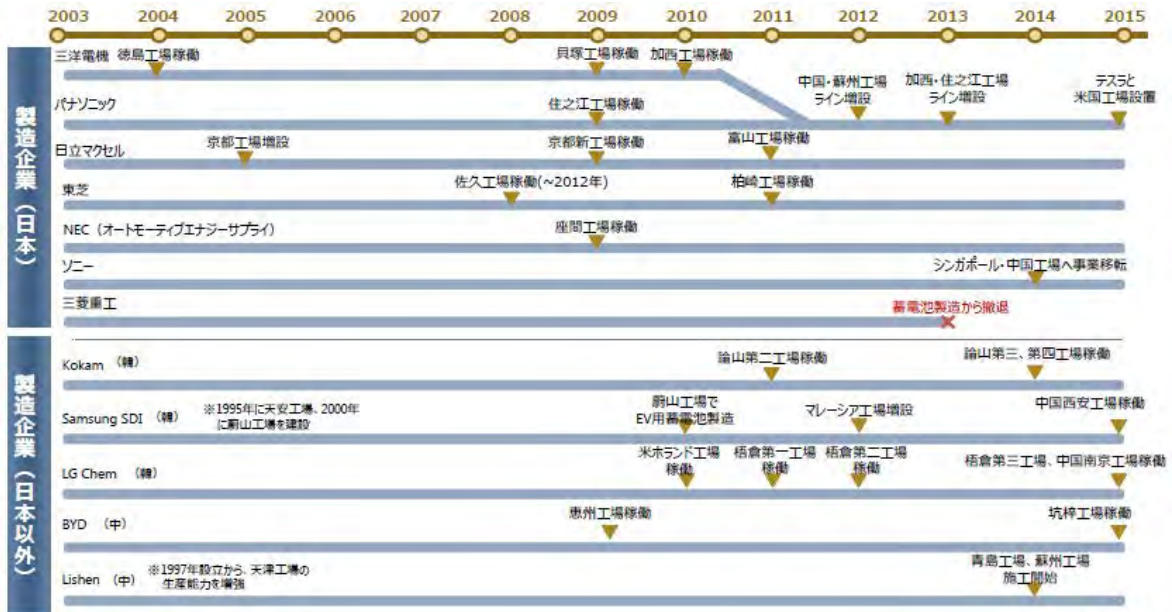
（備考）順不同。エネルギー密度とは、重さ当たりの容量を指す。開発中の蓄電池は代表的なものを紹介しており、全て網羅しているわけではない

出典：日本政策投資銀行，“蓄電池産業の現状と発展に向けた考察”¹²³

¹²³ http://www.dbj.jp/pdf/investigate/area/kansai/pdf_all/kansai1303_01.pdf

また、海外企業も含む蓄電池製造企業の変遷について以下図表のとおりである。

図 31：蓄電池製造企業の変遷



出典：経済産業省, “平成 27 年度 蓄電池を活用した新たなエネルギー産業に関する調査”¹²⁴

¹²⁴ http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2016fy/000300.pdf

5.3 個別企業

5.3.1 サムスン SDI

(1) 基本情報

商号	Samsung SDI Co., Ltd (サムスン SDI)
本社所在地	150-20, Gongse-ro Giheung-gu Yongin-si Gyeonggi
上場年月	1979年2月(韓国取引所)
売上高	7.6兆KRW(2015/12期連結)
総資産	16.2兆KRW(2015/12期連結)
従業員数	9,364人(2016/9期単体)
代表者	Jo,Nam Seong (2014-, President/CEO/Rep Director)
沿革	1970年: ブラウン管事業からスタート 2002年: バッテリー事業をスタート

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDAより作成

(2) 事業の概要¹²⁵

韓国の大手電機メーカーで、サムスングループに属する。太陽電池、燃料電池、電気自動車等輸送用バッテリー、電力貯蔵用大容量ストレージなどを製造販売する。

・蓄電池 (Energy Storage System : ESS) 事業の概要

サムスン SDI は民生小型リチウムイオン電池を主軸としつつ、近年、需要拡大が期待されている xEV や蓄電システム向けの中大型リチウムイオン電池にも注力し、事業領域を広げていくとしている。

車載用リチウムイオン電池に関しては2008年9月に Robert Bosch GmbH と共同でリチウムイオン電池の開発および生産、販売を目的とする「SB LiMotive Co.,Ltd.」を設立したが、2012年9月に合併解消し、2013年1月に SB LiMotive はサムスン SDI に吸収合併されている。足元における同社の車載用リチウムイオン電池の出荷の大部分は BMWi3 向けだと見られる。BMW とは電気自動車用リチウムイオン電池供給サプライヤーとして採用された2009年8月 (SB LiMotive 当時) から EV 用リチウムイオン電池開発、生産に向けた共同開発を進め、その成果として BMW の量産型 EV (i3) と PHEV (i8) に同社のリチウムイオン電池が採用された。

蓄電池事業に関しても日本におけるニチコンへの独占供給をはじめ、市場の立ち上がり時期から早期に取り組んできた。2014年には日本においてメガソーラーに併設される蓄電システム向けに MWh に近い容量のセル供給を行っている。蓄電システムに関しては、2015年にドイツの展示会「Intersolar Europe 2015」において自社オリジナルブランドでの蓄電システムを発表している。これは、太陽光発電インバーター、バッテリー用交直変換装置、蓄電用リチウムイオン電池の3つのコンポーネントを1つのオールインワン製品として提供するものとなっている

¹²⁵ サムスン SDI ウェブサイトおよびプレスリリース : <http://www.samsungsdi.com/>

(容量は 5.5kWh と 8.0kWh の 2 種類)。蓄電システム向けのセルは車載用中大型角形セルを供給している。なお、携帯電話基地局のバックアップ電池向けには円筒形セルを供給している。

出荷動向としては、日本ではニチコンに供給する住宅用がメインとなっており、容量ベースで 8 割以上が住宅用蓄電システム向けの供給が占めると推計する。

加えて同年にはメガソーラーに併設される蓄電システム向けにも供給を行っている。具体的には九州・鹿児島県の徳之島に設置された「御船徳之島太陽光発電所」(出力 1.99MW) に併設の蓄電システム (780kWh) にセルを供給している。本件のメガソーラーと蓄電システムを合わせた全体の EPC サービスはエジソンパワーが担当しており、同発電所は民間の発電事業として、政府の補助金無しで大型蓄電池を併設した国内最初のメガソーラーである。

日本向けは引き続き住宅用、系統安定用 (再生可能エネルギー接続用) をメインに展開しつつ、パートナー社の拡充で法人・業務用向けの出荷も伸ばしていきたい考えである。

日本以外の地域では、アメリカ向の出荷が大きい。2015 年 7 月には北米最大の発電企業であるデューク・エナジー社がテキサス州で運営するノトリス風力発電所向けに、1 万 3,600kWh の蓄電池を供給することを発表している。同風力発電所は 2012 年から 32MWh の鉛電池による蓄電池システムを接続して運営されてきたが、リチウムイオン電池のコンパクトさや長寿命である点をメリットに、鉛電池からの置き換えが順次行われる計画となっている。

一方、アメリカにおける住宅用蓄電システム市場はまだそれほど需要がない。ただし、住宅棟数が多いため、今後注視していくべき市場であると同社は見ている。なお、同社はアメリカにおいて一時期 Extreme Power 社とパートナーシップを締結していたが、Extreme Power 社の破産を受け、現在は大手企業を中心に新たなパートナー企業を模索している状況にある。

欧州向けでは、ドイツをはじめとして欧州は日本同様に住宅用蓄電システムの需要が手堅く期待できるエリアであると同社はみている。

同社は「選択と集中」戦略で従来のケミカル事業部門を売却し、リチウムイオン電池事業に注力する方針である。これからは電子材料事業部、小型電池事業部、中大型電池事業部のみ運営し、特に車載用電池事業に今後 5 年間で 3 兆 KRW を投資し、集中育成する計画である。

車載用電池分野において同社は BMW、Volkswagen、Audi、Porsche、Ferrari、Fiat Chrysler、Jaguar Land Rover、中国の安徽江淮汽車や商用車メーカーの鄭州宇通客車、北汽福田汽車、インドの Mahindra & Mahindra 等、世界有数の自動車メーカーを主要顧客として確保している。車載用電池分野では角形リチウムイオン電池の生産供給に注力しているが、Audi の「R8 e-tron」や安徽江淮汽車の「iEV6s」(当面生産中止) には円筒形リチウムイオン電池を供給している。同社はリチウムイオン電池セル・モジュールの供給がメインであったが、2015 年にオーストラリアの車載用電池バックメーカー「Magna Steyr Battery Systems GmbH & Co OG」を買収し、現状は顧客ニーズに合わせてパッケージングまで行うケースもあるとみられる。これまで同社は PHEV と EV 向けセル供給により注力してきたが、厳しくなりつつある環境規制に対応すべく、欧州自動車メーカーを中心に 48V の電池システムへの関心度が高まっている。48V の電池システムは 1 台当たりの搭載セル数は少ないものの、多くの車種に用いられる可能性があるため、市場は成長すると見込んでいる。同社は世界最大自動車工場として浮上した中国での車載用電

池事業を強化するために、2015年末に現地工場を完工し、安徽江淮汽車や鄭州宇通客車、北汽福田汽車等を顧客として確保するなど、活発な営業活動を行ってきた。しかし、2016年に入り、中国政府が三元系セルを搭載した電気バス向け補助金支給を中止したこと、また、同社が中国政府の車載用電池模範基準認証を得られなかったことを背景に中国市場で苦戦している。

表 10：サムスン SDI 車載用リチウムイオン電池 製品ラインナップ

EV 向け	PHEV 向け	HEV 向け	Hi-Cap
高エネルギー密度	高出力及び高エネルギー密度のバランスの取れた性能	優秀な出力性能と耐久性	スーパーキャパシターとリチウムイオン電池の組み合わせ、急速充放電が必要な低電圧システム向け
94Ah、60Ah	37Ah、26Ah	5.9Ah、5.2Ah	11Ah、4Ah

出典：サムスン SDI ウェブサイト¹²⁶を基に作成

5.3.2. LG 化学

(1) 基本情報

商号	LG Chem Ltd (LG 化学)
本社所在地	Yeoui-daero Yeongdeungpo-gu Seoul
上場年月	2001年4月(韓国取引所)
売上高	20.2兆KRW(2015/12期 連結)
総資産	18.6兆KRW(2015/12期 連結)
従業員数	15,318人(2016/9期 単体)
代表者	Park, Jin Su (2015 - , Rep Director)
沿革	1947年: 化粧品製造会社 Lucky Chemical Industrial Corporation を前身として設立 1995年: LG Chem Ltd (LG 化学) に社名変更 1999年: リチウムイオン電池含む電子材料事業に本格参入

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDA より作成

(2) 事業の概要¹²⁷

韓国の最大手、総合化学メーカーで、LG グループに属する。化学製品、化学素材、電子製品、電子素材、自動車用品、住宅関連商品などを製造販売する

近年では韓国内や米国の自動車メーカーにもリチウムイオンバッテリーを提供するなど、電気自動車やモバイル、エネルギー貯蔵システム (Energy Storage Systems : ESS) といったバッテ

¹²⁶ <http://www.samsungdi.com/automotive-battery/products/prismatic-lithium-ion-battery-cell.html>

¹²⁷ LG 化学 ウェブサイトおよびプレスリリース : <http://www.lgchem.com/global/main>

リーソリューションにも注力している。

・蓄電池（Energy Storage System：ESS）事業の概要

LG化学の電池事業は1997年にリチウムイオン電池のR&Dを開始、1999年に韓国発となる角形リチウムイオン電池の量産に成功し、現在はポリマータイプや円筒形のリチウムイオン電池もラインアップに加えている。同社は民生小型リチウムイオン電池では円筒形、角形、ラミネートの3形状を顧客、製品ごとにカスタマイズし、セルとパックを供給している。近年ではスマートフォン市場の拡大に伴い、ラミネートタイプのセルで同市場におけるプレゼンスを更に高めている。

車載用リチウムイオン電池では2000年にラミネートリチウムイオン電池開発に着手し、2009年に現代・起亜自動車のHEV向けに量産を開始、現在ではGM、ルノー、Ford、Volvo等のxEV向けにリチウムイオン電池供給を行っている。

蓄電池事業としては、パートナー社との協業をベースに数kWh～十数kWhの住宅用蓄電システム、MWクラスの系統安定向け等を対象とする大型蓄電システムを展開している。蓄電システム向けのセルは車載用及び蓄電池専用のラミネートセルをベースにしており、エネルギーセルとパワーセルに区分して供給している（正極材には主にNCMを採用）。なお、価格をより重視するケースやCレート仕様を満たせるために民生小型の円筒形セルを蓄電システム向けに供給しているケースもある。

製品ラインアップとして、同社は日本の住宅用蓄電池市場向けに2015年からLS産電と共同で家庭用蓄電システムを展開している。なお、LS産電と共同で手掛ける家庭用蓄電システムに関しては、中央物産株式会社にもOEM供給¹²⁸しており、同蓄電システムは「平成26年度定置用リチウムイオン電池導入支援事業費補助金」の補助対象機器として登録されている¹²⁹。

LS産電と手掛ける家庭用蓄電システムは6.3kWh、9.45kWh、12.6kWhの3種類の容量ラインアップを揃えている。共に3.15kWhのモジュールが容量の基本構成単位になっていると見られる。両モデルとも太陽光発電との連携やピークシフト機能などに対応している。

日本以外では欧州とオーストラリアをメインターゲットとする住宅用蓄電池(容量6.4kWh)を開発完了し、上市しており、今後、各地域のパートナー社と共に販売を展開していく方針である。

同社はゴム・特殊樹脂、ABS、アクリル等の石油化学製品を取り扱う基礎素材部門、光学素材や高機能性樹脂等を取り扱う情報電子素材部門、ディスプレイ材料と電池材料を取り扱う材料部門、そして民生小型リチウムイオン電池、車載用リチウムイオン電池、ESS用リチウムイオン電池を取り扱う電池部門の4つの柱を軸に事業を展開している。

車載用リチウムイオン電池分野においては、2000年にポリマータイプのラミネート形リチウムイオン電池開発に着手し、2009年に現代自動車のHEV向けに量産を開始、現在では現代自動車、起亜自動車、General Motors、Ford、Tesla、Audi、Daimler、Volvo、Renault、Chrysler、中

¹²⁸ 中央物産では「enenova」ブランドで展開。

¹²⁹ <http://enenova.jp/archives/1450>

国の上海汽車、第一汽車、奇瑞汽車、長安汽車、長城汽車、商用車メーカーの南京金龍客車、東風商用車等、世界有数の自動車メーカーを主要顧客先として確保している。

同社は車載用電池としてラミネート形リチウムイオン電池の生産供給に注力しているが、Tesla の「Roadster」の交換用電池には円筒形リチウムイオン電池を供給している。Tesla の「Roadster」は生産が中止された車種であるものの、「Roadster」の購入者向けに電池パックを含め、多様な車の性能アップができるアップグレードサービスを提供している。従来の 53kWh より大容量の 70kWh パックが用いられ、そこに同社の 21700 円筒形リチウムイオン電池が採用されている。ただ、交換用電池需要が少ないため、Tesla 向けセルの供給量は一部に留まっている様子である。

同社は PHEV と EV 向けセル供給により注力しており、HEV 向けセル供給は現代自動車、起亜自動車に限って行っている。HEV は PHEV や EV に比較し、1 台当たりの搭載セル数が少なく、現状では欧州、北米、中国で大規模の PHEV 及び EV プロジェクトが相次いでいることが背景として挙げられる。

5.3.3. テスラモーターズ

(1) 基本情報

商号	Tesla Motors, Inc. (テスラモーターズ)
本社所在地	3500 Deer Creek Road Palo Alto California United States
上場年月	2010年6月 (ナスダック)
売上高	40億USD (2015/12期 連結)
総資産	81億USD (2015/12期 連結)
従業員数	13,058人 (2015/12期 連結)
代表者	Elon Musk (CEO, Product Architect & Chairman of the Board)
沿革	2003年: 電気自動車を製造販売する企業として設立 2008年: リチウムイオン電池を搭載した車種ロードスターを販売 2012年: 世界初のプレミアムEVセダンである Model S を発売

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDA より作成

(2) 事業の概要^{130 131}

電気自動車 (EV) ベンチャーであり、EV 向けの蓄電池を量産。そのノウハウを活かし、2015年8月に太陽光発電所、ビルの非常電源、家庭などで使用する定置用蓄電池を発売。価格は他社製品の半額以下に抑えるとしている。

- ▶ 家庭用 蓄電容量 10kWh モデル：3,500 ドル 7kWh モデル：3,000 ドル

¹³⁰ テスラモーターズ ウェブサイトおよびプレスリリース：<https://www.tesla.com/>

¹³¹ パナソニック ウェブサイトおよびプレスリリース：<http://panasonic.jp/>

電池セルの供給セルを受けているパナソニックとは2009年にリチウムイオン電池供給契約を交わし、2010年1月にはリチウムイオン電池の供給及びEV用次世代電池の開発を共同で取り組むと発表した¹³²。

さらに、2013年10月には2015年9月から販売している「Model X」に備え、2014年から2017年まで「Model S」と「Model X」に用いられる20億セルの供給契約を締結しており、2017年末頃の発売が予想される「Model 3」向けにもパナソニックからリチウムイオン電池を調達することとなっている。同社は自動車の基幹技術をゼロから手掛けており、パナソニックから調達したリチウムイオン電池を自社でパッケージングしている。同社の電池パックにはパナソニックの18650セルが採用されており、約7,000個のセルを繋ぎ、パック化している。正極材にNCAを採用し、容量を高めたほか、電池パックも高容量化することで1回の充電で最長航続距離が502km（NEDCモード）と従来のEVより長い走行距離と高性能化を実現している。同社は18650セルを数千個活用し、パッケージングすることのメリットとして、①既存の汎用品である18650セルを使用するため、低コスト製造が可能なこと、②1セル当たりのエネルギー量を少なくし、1セルに欠陥が生じても連鎖反応を制御することでその影響を最小限にとどめ、リスク対応ができることを挙げていた。しかし、同社はセル1本当当たりのサイズアップに伴う高容量化により、リチウムイオン電池セルの搭載本数の削減とコストダウンを図るために、2017年末に発売する予定の「Model 3」向けには容量を従来比7割前後増やした新型21700セルを採用するとしている。

同社はパナソニックと連携し、米国のネバダ州に大規模な電池生産工場のGigafactoryを建設している。同工場が完工する2020年までの投資額は50億USD規模になる予定であり、そのうち同社は34億USDを、パナソニックが16億USDを拠出する計画である。同工場では2016年内に一部稼働を開始しており、2020年までにEV換算で50万台分（50GWh）の生産能力を整える計画である。同社は同工場で垂直統合及び規模の経済の達成で30%程度のコストダウンを期待できるとしている。なお、同社は必要な場合、同工場の生産能力を年間150GWhまで拡充することも可能であるとしている¹³³。

上述した通り、同社は2020年までに年間100万台のEVを生産することを目標としているものの、パナソニックの従来の生産能力にGigafactoryの生産能力を寄せても同社の目標には達しないため、今後、電池調達先の多角化の可能性もあると見られる。実際には同社は生産を中止している「Roadster」のアップグレードに必要な交換用電池をパナソニックではなく、LG化学から調達している。

¹³² パナソニック プレスリリース :

<http://news.panasonic.com/jp/press/data/jn111011-2/jn111011-2.html>

¹³³ テスラモーターズ ウェブサイト : <https://www.tesla.com/jp/gigafactory?redirect=no>

5.3.4. 住友電気工業株式会社

(1) 基本情報

商号	住友電気工業株式会社（英訳名：Sumitomo Electric Industries Ltd）
本社所在地	大阪市中央区北浜四丁目5番33号（住友ビル）
上場年月	1949年5月（東京証券取引所）
売上高	2.9兆円（2016/3期 連結）
総資産	2.7兆円（2016/3期 連結）
従業員数	240,865人（2016/03期 連結）, 4,984人（2016/03期 単体）
代表者	松本 正義（2011 - 社長）
沿革	1897年：「住友伸銅場」開設（会社の創業） 1911年：「住友電線製造所」設立（会社の創立） 1920年：「株式会社住友電線製造所」設立（会社の設立） 1939年：社名を「住友電気工業株式会社」（現社名）に改称 1961年：四輪車用ワイヤーハーネスを初納入

出典：会社ウェブサイト、アニュアルレポート、SPEEDA より作成

(2) 事業の概要¹³⁴

電線・ケーブルをコアコンピタンスとする同社グループは、自動車・環境エネルギー・情報通信・エレクトロニクス・産業資材の5分野で高度技術による多彩な製品群を展開し、グローバルな事業活動を行っている。

環境エネルギー関連では、再生可能エネルギーの拡大やスマートグリッドの進展など電力インフラの動向に対応した事業開発を行うため、2010年にパワーシステム研究所を設立、太陽光発電システム、分散電力網制御システム、集光型太陽光パネル（Concentration Photovoltaic；CPV）、レドックスフロー（RF）電池などの取り組みを強化した。

このうちRF電池は1985年から関西電力と共同開発を始め、2001年に世界で初めて実用化に成功し、その後5年間で20施設程度に納入した実績がある。

しかし、当時は負荷平準化用途が主体で需要が限られた上、不況で電力需要が低下したRF電池の事業環境も悪化した。そのため一時は同事業の見直しも進めたが、2008年に政府が再生可能エネルギーの利用促進を打ち出したため、太陽光発電や風力発電の系統安定化や利用効率向上のための電池システムを主要ターゲットとする新たな事業戦略を立て、そのための研究開発を進めた。

その間、NEDO事業（2005年～2008年）による苫前ウィンビラ発電所の「ウィンドファーム出力平滑化実証試験」（30MW風力発電 + 6MWh RF電池）や、同社大阪製作所における「マイクロスマートグリッド実証試験」（太陽光発電 + 風力発電 + 10kWh RF電池：20011～現在）、同横浜製作所構内における「メガワット級大規模蓄発電システム実証試験」（大規模 CPV + 5MWh RF電池 + エネルギーマネジメントシステム：2012年～現在）を行ってきた。

¹³⁴ 住友電気工業 ウェブサイトおよびプレスリリース：<http://www.sei.co.jp/>

これらの取り組みにより、太陽光や風力等の自然エネルギー発電において、①気象条件に左右される不安定な出力を RF 電池の充放電で補償し出力を平滑化できる、②RF 電池と自然エネルギー発電を組み合わせることで計画的発電を行える、③上記①②により火力発電等の系統電源の調整負荷を軽減し、自然エネルギー発電の連系可能量を拡大できる可能性があることなどが実証された。

また、横浜製作所の実証試験では、省エネ機能を主眼とした独自開発の FEMS (Factory Energy Management System) により RF 電池の充放電を最適化してピークカット、ピークシフトに貢献できることも確認された。

2013 年 7 月には北海道電力と共同で行う RF 電池の大規模実証試験の計画が経済産業省の「平成 24 年度大型蓄電システム緊急実証事業」の補助事業として採択されたため、5 年間(2013～2017 年度)に及ぶ同事業がスタートした。この事業では北海道電力の基幹系統の変電所に総蓄電容量 6MWh の RF 電池を設置し、今後さらに導入促進される風力や太陽光等の自然エネルギー発電の出力変動に起因する電力系統の周波数変動、余剰電力に対する RF 電池の調整・系統安定化機能を検証するとともに、RF 電池の最適制御技術の開発を進めている。

横浜製作所の実証試験では、太陽光発電や風力発電等の事業所サイドにおける RF 電池の機能をチェックしたが、今回の事業では変電所等の系統運営事業所における RF 電池の機能を検証する。2014 年度中に設置面積 5,000 m²以上の 2 階建専用建屋を建設し、1 階に電解液タンク、2 階にセルスタックと熱交換器を設置するが、変電所に設置する RF 電池では世界最大規模となる。

これらの様々な取り組みと併せて同社の RF 電池は様々な改良が進められ、出力特性は 2005 年の初期製品に比べて同体積で約 2 倍に向上した。また、電池セルの製造方法も自動化を図り、年産 20MW を超える量産体制を整備した。

営業面では、2013 年度下期から MW 級案件の受注活動を始めており、電力事業者に対する大型蓄電池の設置義務化が始まった米国市場への展開も進める計画でその準備を進めている。

コスト面では、現状の価格では 10～20 万円/kWh でまだ高いが、今後、高出力密度化等の高性能化と量産化によるコストダウンを進め、2020 年頃には揚水発電並みの価格(国内 2.3 万円/kWh)を実現することを目指す。

同社では RF 電池の単独販売だけでなく、独自の集光型太陽光発電装置やエネルギーマネジメントシステムを主軸とする自然発電事業所、工場、電力事業者向け電池・電力管理システム事業を本格展開する計画で、2020 年にその合計売上を 1,000 億円規模に拡大することを目指している。

・蓄電池 (Energy Storage System : ESS) 事業の概要

同社は再生可能エネルギーの利用拡大やスマートグリッドの進展など、電力インフラ分野の技術変革に対応した事業開発を行うため、2010 年 1 月にパワーシステム研究所を設立。以降、太陽光発電システム、分散電源網制御システム、集光型太陽光発電パネル (CPV)、RF 電池等の研究開発体制を強化している。RF 電池は 1985 年から電力の負荷平準化を目的に関西電力と共同開発を始め、2001 年に世界初の実用化に成功した。一時は事業活動を中断した

が、2008年に政府が再生可能エネルギーの利用促進を表明したのを契機に、再エネ導入時の系統安定化や出力平準化用途を主要ターゲットとする事業戦略を立て、そのための研究開発と実証試験を推進している。2015年には北海道電力の南早来変電所に60MWhのRF電池システムを導入予定となっており、海外でも北米において実証試験での導入が予定されている。近年では試験運用がメインではあるが、国内において企業向けの納入実績も有する。

また、2015年6月にはリチウムイオン蓄電システム「Power DEPO II」の発売を発表しており、住宅や小規模オフィス等向け蓄電市場にも参入している¹³⁵。発電や系統側、工場向け等の数百kWh～数十MWhの大容量領域をメインターゲットに据えるRF電池に加え、上記「Power DEPO II」の上市で同社は電力の川下までをカバー可能な蓄電ソリューションを取りそろえたこととなる。

「Power DEPO II」は災害などによる停電時に情報機器や家電製品に電力を供給出来るスタンドアロン型となっている。電気製品で使用する電力の大きさによって充電能力を最適制御する機能を搭載しており、これらの機能によって太陽光発電用パワーコンディショナの自立出力エネルギーを有効利用出来る仕様となっている。無停電電源機能も搭載しており、一般家庭だけに限らず、小規模オフィスや店舗でのBCP対策としての運用にも適する。

同蓄電システムの大きな特長が独自開発の電力変換技術の採用により、エネルギー効率を同社従来製品（POWER DEPO：鉛電池搭載）に比べて20%向上させている点がある。充放電に伴うエネルギー損失を従来方式の半分にしたことで、エネルギーロスが少ないため発熱を抑えられ、コンパクト化・軽量化に加え、低価格化（2.9kWhで定価94万8,000円）を実現したとしている。搭載されているリチウムイオン電池（外部調達）はサイクル寿命6,000回以上の長寿命を実現しており、蓄電池容量保証は8年間となっている。同社は商社、住宅メーカー等の販売パートナーを介し、「POWER DEPO II」を2015年6月に販売を開始している¹³⁶。

¹³⁵ 住友電気工業 ウェブサイト : <http://www.sei.co.jp/products/energy-storage/>

¹³⁶ <http://www.sei.co.jp/products/energy-storage/pdf/powerdepoII.pdf>