

## 第3章 エネルギーセキュリティの変容

### はじめに

我が国では現状、ほとんどのエネルギー源を海外からの輸入に頼り、海外においてエネルギー供給上の何らかの問題が発生した場合、我が国が自律的に資源を確保することが難しいという根本的な脆弱性を有しています。こうした脆弱性は、エネルギー消費の抑制だけで解決されるものではないため、中核的エネルギー源である石油の代替を進め、リスクを分散するとともに、国産エネルギー源を確保すべく努力を重ねてきた歴史があります。

具体的には、(1)二度の世界大戦を経て大規模発電所や工場の電化等により電気市場が拡大し、電力供給量の増大を志向した1900年以降の時代、(2)戦後の復興により、高度経済成長を支える電力市場の成長を踏まえ、石油需要の増大に対応した1940年以降の時代、(3)二度の石油危機を経験し、資源エネルギー庁を新設し、石油のみへの依存状態からの脱却を目指し、①省エネルギー化の促進、②石油備蓄拡大、③天然ガスや原子力の導入を推進した1970～80年代、(4)電力、ガスの自由化が段階的に始まり、また京都議定書により低炭素という環境価値や再生可能エネルギー導入が注目され、自由化と温暖化の2つの課題に取り組んだ1990年以降の時代、(5)東日本大震災・東京電力福島第一原子力発電所事故により過去最大の電力供給危機に直面し、3E(エネルギーの安定供給、経済効率性の向上、環境への適合)に加えS(安全性)の重要性を再認識した2011年以降の時代、(6)世界経済に甚大な影響を与えた新型コロナウイルスによりエネルギー需給を含めた持続可能な社会構築に向けて世界が一斉に舵を切ろうとしている2020年以降の時代それぞれにおいて、エネルギーを巡る情勢変化を見極めた上で、政策的な対応を進めてきました。エネルギーを巡る情勢は日々変化しており、現段階で完璧なエネルギー源が存在しない以上、エネルギーセキュリティ確保の取組に終わりはありません。

我が国のみならず、国際的にも、エネルギーセキュリティの確保は重要な課題として位置づけら

れています。二度の石油危機を契機に設立された国際エネルギー機関(IEA)では、エネルギーセキュリティを設立以来の主要課題として位置づけ、各国に対し政策提言を行っていますが、その内容は世界のエネルギー情勢の変化に応じて、日々拡大してきています。IEAがカバーするエネルギー源は、設立当初の石油から、天然ガス、再生可能エネルギーを含む電力へと拡大を続けています。また、デジタル化の進展に伴い、太陽光・風力等の自然変動電源の大量導入に必要な柔軟性(フレキシビリティ)やサイバーセキュリティの確保など、新たな時代におけるエネルギーセキュリティ要素についても検討が深められています。さらに、カーボンニュートラルの実現に向け、電化し切れない産業の熱需要等を脱炭素化するために必要となる水素やアンモニアなど、新たな燃料に関する検討も始まっています。こうした国際的な議論を概観することも、我が国のエネルギーセキュリティを考える上で有用です。

本章では、まず化石燃料の確保を中心とした我が国のエネルギーセキュリティの取組を概観した上で、足下の構造変化を踏まえて考慮すべき新たなエネルギーセキュリティ要素を示します。最後に、こうした構造変化を踏まえ、主要国と比較しながら、我が国のエネルギーセキュリティの定量的な評価を試みます。

## 第1節 化石資源に係るエネルギーセキュリティ

### 1. 一次エネルギー自給率の現状

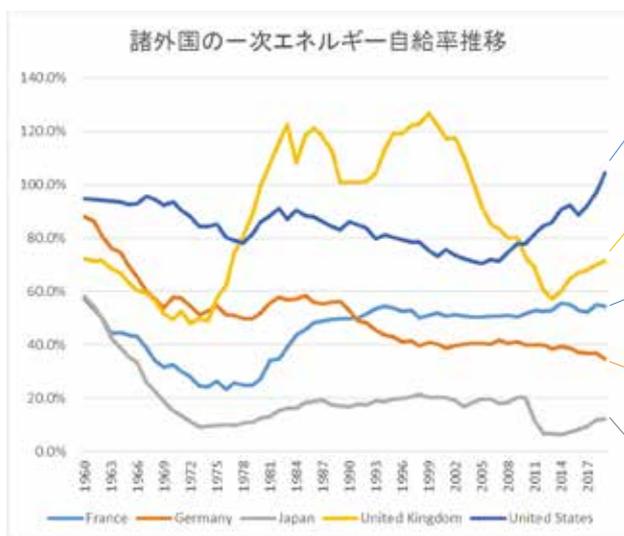
1973年、1979年の二度の石油危機で、エネルギーの大半を政情が不安定な中東からの輸入に頼ることのリスクが顕在化し、脱石油依存の観点から、原子力・石炭・天然ガスの開発が進められました。1980年代以降高まったエネルギー自給率は2010年には20.3%に至りましたが、2011年に東日本大震災と東京電力福島第一原子力発電所事故を契機とした原子力発電量の減少に伴い、約6%まで低下しました。足下では「固定価格買取制度(FIT)」の導入による再生可能エネルギー発電量の増加や、原子力発電所の再稼働、省エネルギー化のさらなる進展などによってエネルギー自給率は2018年に11.8%に回復してきているものの、東日本大震災前の2010年の水準には遠く及びません(第131-1-1)。世界のエネルギー動向に目を転じると、過去10年で、最も特徴的な変化を見せたのがシェール革命を起こした米国です。元々先進国の中では自給率の高かった米国で

すが、シェールガス・シェールオイルの生産により自給率が向上しています。同じく近年自給率を上昇させているのが英国で、洋上風力・原子力に牽引される形で自給率を伸ばしています。電力に占める原子力の割合が高いフランスも高水準の自給率を維持しており、ドイツのエネルギー自給率は、長期的に低下傾向にあるものの、高い再生可能エネルギー普及率、石炭の国内生産、原子力発電の利用によって、日本の倍以上の自給率を維持しています。

### 2. 化石燃料の調達先多角化と権益確保の状況

一次エネルギーの約9割を輸入に頼る我が国にとって、化石燃料の安価で安定的な確保はエネルギーセキュリティ上重要なテーマです。エネルギーセキュリティ向上のためには、燃料種の多様化と調達先の多角化、チョークポイント<sup>1</sup>リスクの低減等の取組が必要になります。例えば原油に関しては、チョークポイントを通過せずに輸入が可能なロシア産を確保することで、中東依存度の低下を図り、天然ガスについてはロシア・アフリカ・東南アジア・豪州・北米と、世界各地に調達先を広げることで、

【第131-1-1】各国の一次エネルギー自給率の推移



#### 各国の特徴

- 【アメリカ】
  - ✓ シェールガス、シェールオイル生産でほぼ全てのガス・石油需要を自給
- 【イギリス】
  - ✓ 北海油田の石油や風力発電・原子力の拡大により高い自給率
- 【フランス】
  - ✓ 電源構成に占める原子力発電の割合は高いものの、その他の資源は輸入に依存
- 【ドイツ】
  - ✓ 高い再エネ普及、石炭の国内生産、原子力発電の利用から一定の自給率
- 【日本】
  - ✓ 化石資源をほぼ全て海外に依存、再エネの利用は拡大も原子力発電の利用が進まず、極めて低い自給率

出典：総合資源エネルギー調査会第38回基本政策分科会資料より抜粋

<sup>1</sup> 物資輸送ルートとして広く使われている狭い海峡のことで、米国エネルギー省エネルギー情報局(EIA)が示したレポートにあるチョークポイント8カ所、すなわちホルムズ海峡、マラッカ海峡、バル・エブ・マンデブ海峡、スエズ運河、トルコ海峡、パナマ運河、デンマーク海峡、喜望峯を指します。

【第131-2-1】化石燃料の調達先多角化と権益確保の状況

**ロシア【原油・天然ガス】**  
 ○地理的に近接しており、チョークポイントを通過せず輸入が可能。  
 ○極東・東シベリア・北極圏における石油・天然ガス開発へ日本企業が参画・関心。  
 ○2016年12月の日露首脳会談以降、日露の官民で合意した多数の石油・天然ガス関連のプロジェクトは着実に進展。  
 ○2019年9月、日本企業が参画する北極LNG2プロジェクトが最終投資決定。2023年生産開始予定。

**UAE（アブダビ首長国）【原油】**  
 ○我が国の石油権益を維持・拡大するため、広範な分野で協力を実施。  
 ○アブダビの油田には、我が国自主開発権益が最も多く集中。  
 ○2015年4月、我が国企業が巨大な陸上油田の権益を新たに獲得。  
 ○2018年2月、主要な海上油田の権益を再獲得。

**豪州【天然ガス】**  
 ○日本企業参画のLNGプロジェクトが進行中。  
 ○イクスLNGプロジェクトは日本企業が主導する初の大型LNGプロジェクト。2018年に生産開始。



**モザンビーク、東南アジア、カナダ【天然ガス】**  
 ○日本企業参画のLNGプロジェクトが進行中。

**米国【天然ガス】**  
 ○日本企業参画のLNGプロジェクトが進行中。  
 ○2016年以降、LNGの輸出を開始。  
 ○2017年1月に、シェールガス由来のLNGが初めて日本に輸入（短期契約）。  
 ○2018年5月、日本として初めての長期契約に基づく米国シェールガス由来のLNGの輸入を開始。

出典：総合資源エネルギー調査会第38回基本政策分科会資料より抜粋

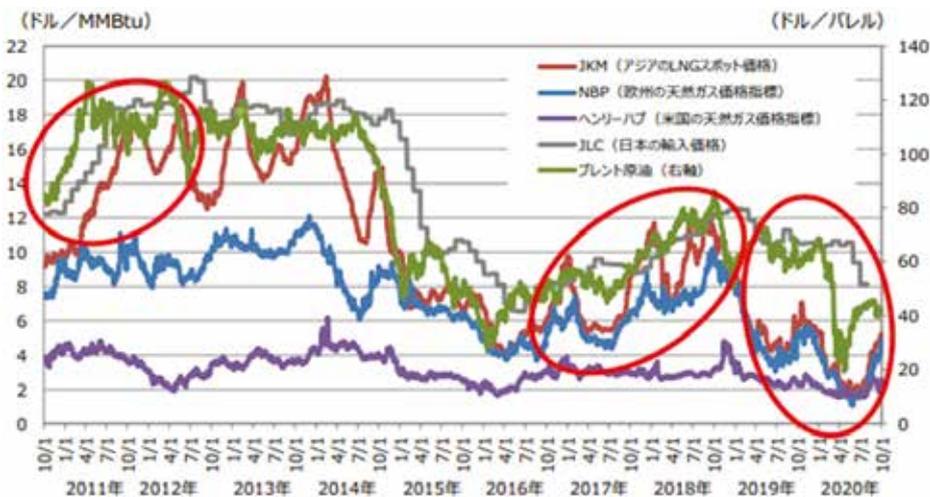
リスクの分散を図っています。積極的な資源外交やJOGMECを通じた海外プロジェクトへのリスクマネー供給等を通じ、更なる海外権益の確保を進める必要があります(第131-2-1)。

3. 天然ガス・LNG市場価格の推移

天然ガス・LNGは、化石燃料の中で相対的に二酸化炭素の排出量が少なく、天候等に発電量が左右される太陽光・風力等の導入拡大に不可欠な柔軟性

(フレキシビリティ)を供給することに優れており、特にカーボンニュートラルに向けた「移行」を後押しする技術として、重要性が増しています。天然ガス・LNGの市場価格は、アジア市場の需給状況に加え、原油価格の水準に連動して変化するものが多く、価格の変動幅が大きいという特徴があります。エネルギーセキュリティ向上の観点からは、大幅な価格上昇が起きた場合にも小売価格が高騰しないよう、金融的手法等を講じて対応する必要があります(第131-3-1)。

【第131-3-1】天然ガス・LNG市場価格の推移



出典：S&P Global Platts, and others.

C O L U M N

2020年度冬期の日本の電力需給ひっ迫とスポット市場価格高騰を巡る対策

2020年12月中旬以降、日本では、断続的な寒波による電力需要増加とLNGの在庫減少によるLNG火力発電の稼働抑制などにより、電力需給ひっ迫とそれに伴うスポット市場（以下「市場」という。）価格高騰が発生しました。まず12月中旬に、一部のエリアにおいて電力需給が厳しい時期が生じ、LNGの燃料消費が進みました。また、市場価格は比較的落ち着いて推移していたものの、平時よりは高値水準となりました。その後12月下旬は需要も比較的落ち着き、供給力も向上したものの、石炭火力発電所のトラブル停止やLNG火力の燃料制約実施に伴い、市場への売り玉が切れるようになり、市場価格がかなりの高値を付け始めました。1月上旬になると、全国にわたって10年に一度の需要が発生した日が複数生じるなど、最も厳しい需給状況となり、市場価格が高騰しました。1月中旬には、需要が例年までに落ち着き、供給力も増加しましたが、売り切れ状態・市場価格高騰は継続したままでした。その後、インバランス料金の上限価格の導入や燃料在庫が増加傾向となってきたことにより、徐々に市場価格も落ち着き、1月25日の週には、事象はおおむね沈静化しました(第131-3-2)。

【第131-3-2】2020年度冬期の需給ひっ迫・市場高騰を巡る時系列整理

|                  | ①12月中旬  | ②12月下旬～1月初旬  | ③1月上旬  | ④1月中旬   |
|------------------|---|--|--|---|
| 概要               | 需給が厳しく、LNG消費進む<br>市場価格は落ち着いて推移                                    | 需要低下も、厳しい需給状況<br>燃料制約で売り切れ常態化                          | 需給が最も厳しい時期<br>価格高騰   | 需給緩むものの、市場<br>売り切れ・価格高騰継続   |
| 需要               | 需要増<br>※過去4年平均：4%増 (12/11~12/25)                                  | 需要例年並み<br>※過去4年平均：2%増 (12/26~1/5)                      | 需要増加日が継続<br>※全国にわたって厳しい日あり (1/8,12)<br>※過去4年平均：11%増 (1/6~1/12) | 需要落ち着く<br>※過去4年平均：1%減 (1/13~1/25)   |
| 供給力              | LNG消費進む<br>川内②稼働 (12/24)  | 燃料制約実施<br>石炭火カトラブル停止                                   | 燃料制約継続<br>石炭火カトラブル停止<br>※日によっては太陽光出力低下発生                       | 燃料在庫量増加傾向<br>大飯④稼働(1/17)  |
| 市場               | 価格は比較的<br>落ち着いて推移<br>市場平均価格：13.3円 (12/11~12/25)<br>(2019年度：8.25円) | 売り切れ状態常態化<br>市場平均価格：34.7円 (12/26~1/5)<br>(2019年度：6.8円) | 価格高騰<br>市場平均価格：102.7円 (1/6~1/12)<br>(2019年度：7.9円)              | 売り切れ・価格高騰継続<br>市場平均価格：74.6円 (1/13~1/25)<br>(2019年度：8.1円)<br>※日平均・コマ別最高価格発生、週明けから沈静化 |
| エネルギー・広域<br>機関対応 | 関西への融通実施<br>(12/15,16)  | 関西(12/27,28)<br>・東京(1/3,4)への<br>融通実施                   | 全国的に電力融通指示<br>※計162回実施   | 効率的な使用呼びかけ<br>インバランス料金上限設定  |

※10月実施の冬期需給検証では、厳気象にも対応できる予備率確保を確認(※kW評価)

出典：総合資源エネルギー調査会第34回電力・ガス基本政策小委員会資料より抜粋

これを受け、資源エネルギー庁の審議会や電力・ガス取引監視等委員会において、原因究明や検証を行いました。2020年度冬期の電力需給ひっ迫は、断続的な寒波による電力需要の大幅な増加とLNG供給設備のトラブル等に起因したLNG在庫減少によるLNG火力の稼働抑制が主因だったと考えられます。さらに、石炭火力のトラブル停止や濁水による水力の利用率低下、太陽光の発電量変動といった事象が重なったことで、LNG火力等への依存度が高まり、需給ひっ迫が増幅される結果となりました。こうした需給ひっ迫の背景には、石油火力の休廃止や稼働中原発の減少という構造的な事象も存在しています。また、市場においては、これまでに入手したデータ等に基づく監視・分析によれば、相場を変動させることを目的とした売惜しみ等の問題となる行為は確認されませんでした。燃料不足の懸念による供給力の減少と寒波による需要増などにより売り切れ状態が継続的に発生し、スパイラル的に買い入れ価格が上昇した結果、市場価格が高騰しておりました。

こうした検証を踏まえ、2020年度冬期の教訓を最大限に活かせるよう、電力需給のひっ迫やそれに伴う市場での売り切れ継続を前もって防ぐための「予防対策」、電力量(kWh)不足が懸念されたり、差し迫っ

たりした際の対応の整理やセーフティネットの措置といった「警戒時・緊急時対策」、さらには、安定供給とカーボンニュートラルの両立に向けた供給力の確保や新規投資を促すための措置など自由化の進展や脱炭素の流れを踏まえた電気事業の構造的変化を受けて今から対応・検討していくべき「構造的対策」について、取りまとめ(案)を公表し、国民の皆様の御意見を頂いているところです(第131-3-3)。

これらの対策を通じて、今後、同様の事象が生じないように取り組むとともに、持続可能な電力システムの構築に向けて引き続き検討を行っていきます。

【第131-3-3】電力需給ひっ迫・市場価格高騰に係る事象要因と対策のポイント

| 事象の要因  |  |   |
|--|--|---|
| <b>需給ひっ迫の要因</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>断続的な寒波による電力需要の大幅な増加とLNG供給設備のトラブル等に起因したLNG在庫減少によるLNG火力の稼働抑制が主因。</li> <li>背景には、石油火力の休廃止や稼働中原発の減少といった供給力低下が構造的に存在する一方、水力の利用率低下、太陽光の発電量変動を補う調整力の重要性向上といった背景もあり、火力に依存した供給構造が存在。</li> </ul> | <b>市場価格高騰の要因</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>需給ひっ迫に伴い、電力市場において、売り切れ状態が継続的に発生し、スパイラル的に買入札価格が上昇。</li> <li>電力・ガス取引監視等委員会において、大手電力会社への報告徴収や公開ヒアリング等を通じた検証が行われたが、相場を変動させることを目的とした売り惜しみ等の問題となる行為は確認されなかった。</li> </ul> |   |
| 教訓を踏まえた主要対策パッケージ   |  |   |
| <b>予防対策<br/>(来冬までに措置)</b><br><br><b>緊急時対策</b><br><br><b>構造的対策</b>  | <b>需給ひっ迫への対策</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>夏冬の需要ピーク時に kWh(燃料)不足リスクを含めた需給検証を実施するとともに、燃料の確保状況をモニタリングする仕組みを導入。</li> <li>国発電事業者等による望ましい燃料確保の在り方を示す「燃料ガイドライン(仮称)」を策定。</li> </ul>                                   | <b>市場価格高騰への対策</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>市場の信頼性を高めるための情報開示の充実や、スポット市場への適切な売り入札を促すための監視を強化。</li> <li>先渡・先物市場など、事前に電力を取引するための市場のオークション回数の増加、拠出金の低減、普及啓発などのヘッジ市場活性化策を実施。</li> </ul>  |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>燃料不足が懸念される際に、「警戒対応体制」を構築し、事業者間の融通の円滑化や需要家への働きかけを実施。</li> <li>「でんき予報」において、kWの情報だけでなく、kWh情報の発信を追加するなど、情報発信を拡充。</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>市場のスパイラル的な買入札価格の上昇を未然に防ぐため、市場のセーフティネットを導入(精算金の上限価格を80円/kWh、200円/kWhの2段階で設定)。</li> <li>一般送配電事業者の精算金(インバンス)収支については、託送料金等を通じて還元・調整の措置を講じる。FIT収支余剰についても、国民還元を実施。</li> </ul>  |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>容量市場により安定供給に必要な供給力を確保しつつ、カーボンニュートラルとの両立に向け、非効率石炭フェードアウトを着実に進めるとともに、新規投資の予見性を高める措置を検討。</li> <li>広域的融通の強化に向けた系統整備に向けたマスタープランの策定や、既存系統を最大限活用するための措置を実施。</li> </ul>                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>小売事業者等による適切な市場リスク評価・管理の在り方を示す「リスクマネジメントガイドライン(仮称)」を策定。</li> <li>今冬の市場価格高騰を巡り様々な課題が提起されたことを踏まえ、支配的事業者の発電・小売事業の在り方について検討を進める観点から、電取委において、旧一電の内外無差別な卸売の実効性を高め、社内・グループ内取引の透明性を確保するためのあらゆる課題について、総合的に検討。</li> </ul> |

出典：総合資源エネルギー調査会第34回電力・ガス基本政策小委員会資料より抜粋・一部修正

## 第2節 エネルギーセキュリティの構造変化

### 1. 国際的なエネルギーセキュリティの重点の変遷

石油危機を契機に1974年にIEAが設立されて以来、エネルギーセキュリティはIEAの主要課題の一つであり続けています。設立してしばらくは化石燃料を中心としたエネルギーセキュリティの議論が進められましたが、その後の世界情勢の変化を受け、IEAがエネルギーセキュリティの文脈で議論するテーマは順次、広がってきています。

こうした変遷が端的に表れているのが、IEAが毎年発行する「World Energy Outlook」(以下「WEO」という。)冒頭のエグゼクティブ・サマリーです。WEOは1977年に創刊されたIEAの代表的な刊行物であり、エネルギーの需給や技術開発に関する見通しなどを示しています。WEOのエグゼクティブ・サマリーには、IEAがその年のWEOで特に強調する内容が要約されています。

化石燃料中心の議論が転換し始めたのが、2008年以降です<sup>2</sup>。WEO2008では気候変動対策の必要性を強く主張し、WEO2010では、2009年第15回気候変動枠組条約国会議(COP15)におけるコペンハーゲン合意<sup>3</sup>を失敗と断じ、天然ガスと電力(特に再生可能エネルギー)による低炭素化加速の重要性を強調しています。WEO2012になると、「水力の順調な増加と風力・太陽光の急増がエネルギーミックスにおける再生可能エネルギーの位置をゆるぎないものにした」とするなど再生可能エネルギーの拡大を好意的に記載しています。しかし、WEO2016になると、太陽光や風力等の自然変動電源の大量導入時には系統増強やバックアップ電源が必要となるなど課題が指摘され始め、各国で進む自然変動電源の導入拡大に伴う電力システムの脆弱性も認識されるようになりました。2008年から2015年頃は、化石燃料の安定調達を中心としたエネルギーセキュリティの議論から、気候変動対策や、自然変動電源の導入拡

大に伴う電力システム全体での安定性の確保など多様な要素を含むエネルギーセキュリティの議論へと認識が徐々に広まっていった時期と見るができます。

WEO2017では、2016年に史上初めて電力投資額が石油・ガス投資額を上回ったことを取り上げ、電力セキュリティの重要性の高まりが強調されています。あわせて、太陽光・風力等の自然変動電源の導入増加に伴い、電力システムの安定性を確保するための系統増強やバックアップ電源の必要性が強調されています。あわせて、経済のデジタル化が電力部門において進めば柔軟性を効率的に調達できるようになるとする一方で、デジタル化に伴って新たな電力システムの脆弱性が生じ得るとも述べています。こうした問題意識から、IEAは2017年以降、エネルギーセクターのデジタル化にも焦点を当てるようになっていきます。

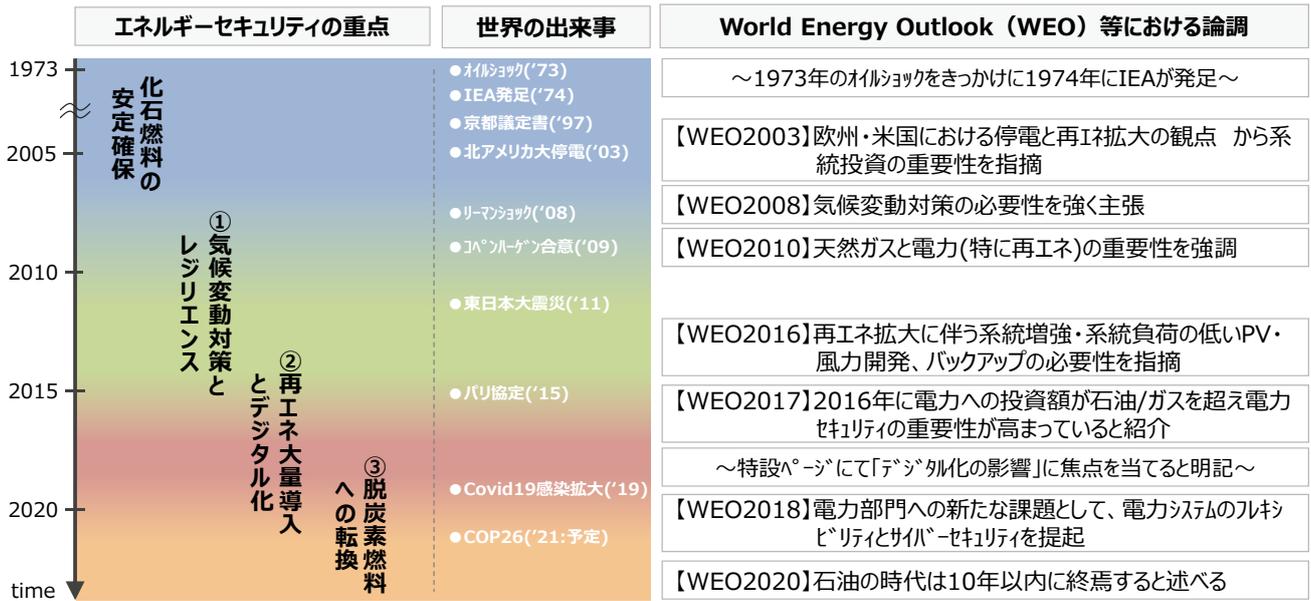
WEO2019では、エネルギーの脱炭素化や、電力以外のあらゆるセクターを巻き込んだエネルギーシステム全体の抜本的な転換が論じられるようになってきました。脱炭素化は、単一手段では達成できず、省エネルギー、電化の促進、原子力の活用を含む電力の脱炭素化、熱需要の水素化、それでも残るCO<sub>2</sub>については分離回収をする(Carbon Capture, Utilization & Storage: CCUS)など、あらゆるエネルギー源とエネルギー技術を総動員することが重要である旨が強調されています。WEO2020では、「10年以内に石油成長の時代は終わりを迎える」とし、エネルギーの脱炭素化に関する記載が厚みを増しています。また2020年には世界の100以上の国・地域が2050年のカーボンニュートラル実現を宣言したことなどから、2050年に世界全体で脱炭素社会を実現する「Net Zero Emissions by 2050 case」が複数シナリオの一つとして新設されていることも特徴の一つです(第132-1-1)。

このような国際的なエネルギーセキュリティの議論は、我が国にも当てはまるどころが大きく、我が国のエネルギーセキュリティの議論を深めていくに当たっても示唆に富むものと言えます。

<sup>2</sup> 北米大停電が発生した2003年にも、再生可能エネルギーの導入拡大に向けた系統投資の重要性が指摘されましたが、ただ、この年のWEOの中心に据えられたのは引き続き「石油の安定調達」でした。

<sup>3</sup> 京都議定書に続く、温暖化対策の国際的なルール(次期枠組)を決めることを目的とした合意内容でしたが、数力国が合意の採択に反対したため、拘束力のある数値目標など、新たな仕組みを決定する最終合意に至ることはできませんでした。

【第132-1-1】エネルギーセキュリティの重点の変遷(IEA)



出典：IEA「World Energy Outlook 2003-2020」より経済産業省作成

## 2. 気候変動・レジリエンスの観点からみたエネルギーセキュリティ

自然変動電源の導入が世界的に拡大する中、電力システムの安定性を確保するには、エネルギーシステムの分散化や、電力融通能力の強化につながる系統整備の促進、短時間で出力を調整できる柔軟性のある電源や水素・蓄電池等の蓄電能力の強化等がますます重要になってきます。

また、台風や地震等、自然災害の激甚化傾向を踏まえ、災害によるダメージを最小化し、なるべく短期間で復旧、復興するための取組も重要であり、世界で議論が活発化してきています。

### (1) 自然変動電源の導入拡大に伴い求められる電力セキュリティの重要要素

#### ① 送配電部門での対応

電力システムのうち、特に送配電部門において、IEAは、静的信頼性(Adequacy)、動的信頼性(Operational Security)、強靱性(Resilience)の3点を電力セキュリティの重要要素として示しています。まず、静的信頼性とは、通常時において、適切な供給予備力を有するとともに、

送電余力を確保できており、全ての電力需要を問題なく供給可能な状態を示します。次に、動的信頼性は、電力システムが通常時に問題なく稼働し続け、また、落雷など、様々な突発的な事象が発生した際に、可能な限り早く通常の状態に戻る能力を有する状態を示します。最後に、強靱性は、電力システム及びその構成要素が、短期の負荷変動や長期的な電源構成の変化等に耐え得る状態を示します(第132-2-1)。

### 【第132-2-1】IEAが定義する送配電に関するエネルギーセキュリティ上の重要要素

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| <b>Adequacy</b>             | 通常の動作条件下で常にエリア内の総電力需要を供給できる状態にあること                             |
| <b>Operational security</b> | 電力システムが通常の状態を維持する能力、またはあらゆる種類のイベントの後にできるだけ早く通常の状態に戻る能力を有していること |
| <b>Resilience</b>           | 電力システムおよびその構成要素が、短期の不可変動や長期的な電源構成の変化等に耐えうる状態にあること              |

出典：IEA「Power Systems in Transition」より経済産業省作成

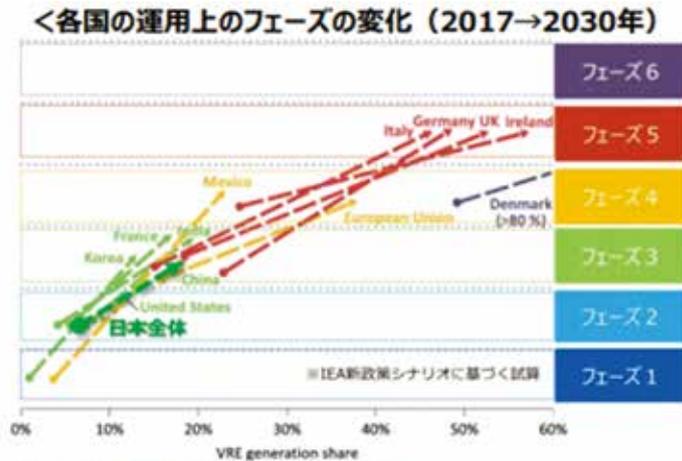
②蓄電技術や需要側での対応

太陽光や風力等の自然変動電源が電力システム全体に占める比率が高まると、これを補う調整力の重要性が飛躍的に高まります。当面はガス火力・揚水発電等を活用しつつ、中長期的には系統増強による地域間の電力融通の促進や、蓄電池やEVの導入やダイヤモンドリスポンスの活用等の需要側への働きかけ等が重要になります。

さらなる蓄電能力の強化には、次世代蓄電池や、

合成燃料、水素、アンモニア等を活用した電力貯蔵技術が有望ですが、これらの技術は様々な理由から現時点ではまだまだコスト高です。こうした技術が社会実装されるには、研究開発と実証が進展し、既存の蓄電技術等と同程度までコスト低減が進むことが必要です。政府としては、グリーンイノベーション基金等も活用しながら、強力に後押しをしていきます(第132-2-2、第132-2-3、第132-2-4)。

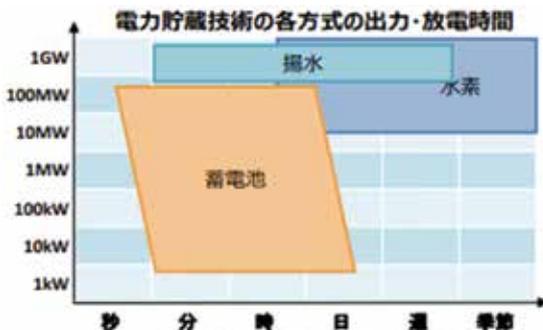
【第132-2-2】各国の運用上のフェーズの変化



- フェーズ1：ローカル系統での調整が必要となる。
- フェーズ2：系統混雑が現れ始め、需要と変動再生エネのバランスが必要となる。
- フェーズ3：出力制御が起こり、柔軟な調整力や大規模なシステム変更が必要となる。
- フェーズ4：変動再生エネを大前提とした系統と発電機能が必要となる。
- フェーズ5：変動再生エネの供給が頻繁に需要を上回り、交通や熱の電化による柔軟性確保が必要になる。
- フェーズ6：変動再生エネの余剰・不足がより長い時間軸で発生し、合成燃料や水素等による季節貯蔵が必要になる。

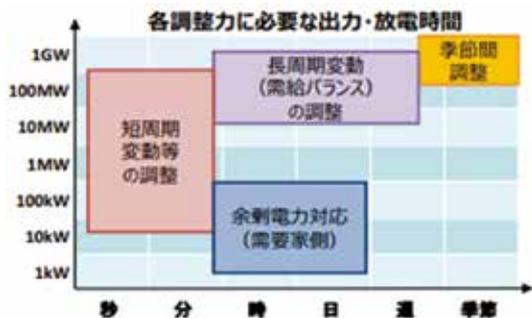
出典：IEA「World Energy Outlook 2018」より経済産業省作成

【第132-2-3】電力貯蔵技術の各方式の出力・放電時間



出典：IEA「Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells」より経済産業省作成

【第132-2-4】各調整力に必要な出力・放電時間



出典：IEA「Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells」より経済産業省作成

## C O L U M N

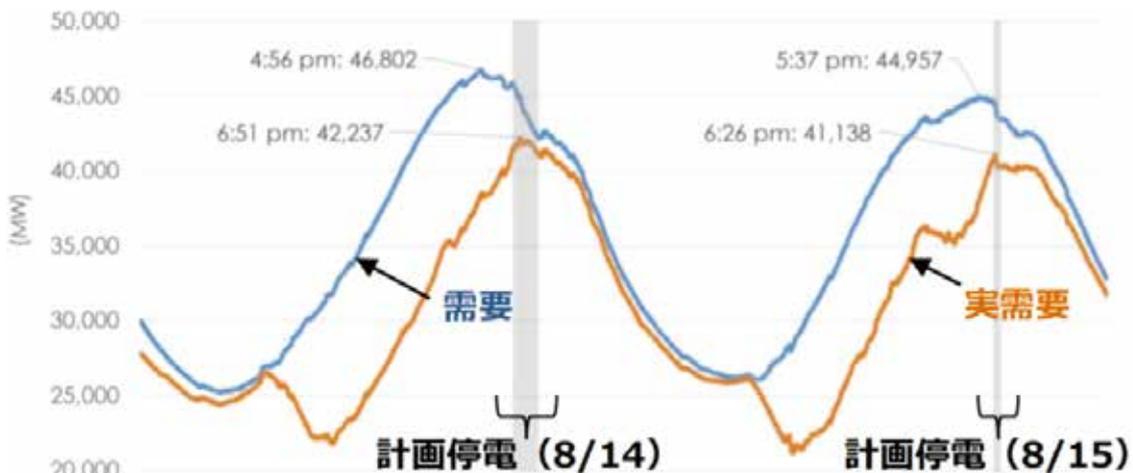
## カリフォルニア州の大規模停電について(2020年8月)

2020年8月、カリフォルニア州で計画停電が実施されました。同州デスバレーにおいて、当時世界で過去3番目の記録となる華氏130度(摂氏54.4度)を記録するなど、歴史的猛暑により西部地帯一帯で電力需要の増加が見られました。同州は太陽光発電の導入を進めており、以前より、太陽光発電の発電量が減少する日没に実需要(需要から太陽光発電の発電量を差し引いたもの)が急激に立ち上がる現象がダックカーブ現象として課題視されていました。実需要の曲線がアヒルの姿のように見えることから名づけられたこの現象は、急激な需要の立ち上がりに対応できるだけの応答性の高い発電設備を必要とします。計画停電はいずれも実需要がピークの時に発生しており、猛暑から来る大きな電力需要に対応できなかったことが要因の一つとして考えられています。(第132-2-5)。

また、別の要因として、卸電力市場の一部機能不備が指摘されています。域内の需要計画が過小に見積もられ、「前日市場」への需要入札量が不足する事態が発生したのです。これにより、市場システムにおいて、域内需要が少ないと誤認された結果、域外に電力を輸出するための需要入札が約定する結果となりました。そのため、域内は需給ひっ迫の状況にあるにも関わらず、一部の電力が域外に輸出されることとなったのです。

カリフォルニア州の大きな特徴として、州外からの電力輸入に依存している点、再生可能エネルギーの比率が急速に上昇している点、小売事業者が自社の供給する需要量に対して一定量の発電能力を調達する容量メカニズムが複数併存している点が挙げられます。輸入に依存していることから、例えば今回のように隣の州でも同じように電力需要が増加した場合、同州の需給はひっ迫することとなります。同州の場合、高い比率で導入されている再生可能エネルギー発電設備の多くが、太陽電池や風力といった発電量が天候に左右される発電設備のため、それらの出力が低いタイミングが需要ピークに重なると、更に需給ひっ迫することとなります。このような性質を持つ地域で、安定的に電力を供給するためには、十分な予備力が求められることが分かります。

【第132-2-5】需要及び実需要(2020/8/14～2020/8/15)



出典：Preliminary Root Cause Analysis Mid-August 2020 Heat Storm (Oct.6, 2020)より経済産業省作成

**(3) 世界で進むエネルギーレジリエンスの議論**

エネルギーシステム強靱化の必要性は、日本だけでなく、広く世界に共通するものです。

例えば、アジア太平洋地域の21の国と地域(エコノミー)が参加する経済協力の枠組みであるAPEC(アジア太平洋経済協力)では、持続可能な成長と繁栄のため、過去数年にわたり、エネルギーレジリエンスに関する議論がされてきました。2014年のAPEC首脳宣言の付属文書である「2015-2025年APEC連結性ブループリント」を受けて、2015年のエネルギー大臣会合ではエネルギーレジリエンスが主要テーマとされ、エネルギー安全保障と持続可能な発展を推進する上で、エネルギーレジリエンスを高めることが重要との認識が共有され、成果文書として「セブ宣言」が公表されました。セブ宣言に基づき、エネルギーワーキンググループの下にエネルギーレジリエンスタスクフォースが新たに設置され、2015年12月以降、エネルギーレジリエンスに関する取組や知見の共有とともに議論が進められ、2020年8月、エネルギーレジリエンス原則が国際合意となりました。エネルギーレジリエンス原則では、「国ごとによってエネルギー事情は多様であり、エネルギーレジリエンスのために取るべき措置は、多

様性を踏まえ各国がそれぞれ判断すべき」との原則のもと、ステークホルダーやエネルギーレジリエンスに資する取組の特定、これを実現する技術に投資が回る仕組み作りの必要性に触れています。エネルギーレジリエンスに資する取組として、電源や燃料調達先の多様化、システムの強化・分散化などが考えられ、このような取組を具体化したガイドラインの作成が今後進められる予定です。

アジアに加え、欧州を始めとした世界でもエネルギーレジリエンスへの関心が高まっています。例えば、毎年スイスのダボスで年次総会を開催している世界経済フォーラム(World Economic Forum)では保険会社・機関投資家による「Insurance & Asset Management Industry Group」が組織され、2021年4月からエネルギーを含むレジリエンスについて本格的な議論が始まっており、レジリエンスを定量評価するための「Resilience Index」策定に向けた取組が活発化しています<sup>4</sup>。また、日米欧の再保険会社や金融機関、電力会社、学術機関の有志が集まって「Energy Resilience Study Group」を組織し、2021年3月にエネルギーレジリエンスの重要性に関する報告書を発出しています<sup>5</sup>。

## C O L U M N

**エネルギーレジリエンスの定量評価の取組**

自然災害の激甚化が進む中、災害による損害を極小化するとともに、早期の復旧・復興につなげ、以前よりも強靱性を高める(Build Back Better)ための仕組みや能力が必要です。とりわけ、エネルギーはあらゆる産業活動や国民生活の基盤であることから、電力、ガス、石油や水道等の公共インフラの頑健性向上や、こうしたインフラが被災した場合に早期復旧・復興するための仕組みの整備が、住民生活と企業活動の双方にとって重要です。

日本は、台風による風水害や地震など様々な災害対応の経験と知見を有しています。例えば、大手損害保険会社等は、ビッグデータやAIを活用し、自然災害による被害を地域ごとに精度高く予測し、自治体や企業等に備えを促しています。また、電力・ガス・石油等のエネルギー企業は、風水害や地震等に強い供給網の構築や、災害対応のために自治体や他の事業者と円滑に連携するための事前の枠組み作り等に多角的に取り組んできています。

しかしながら、自然災害による被害の最小化と早期の復旧・復興を確実なものとするためには、エネルギー供給側の取組だけでは十分ではなく、エネルギーを利用する側である企業等における取組の更なる強化が必要です。これまで個別企業による自社の事業継続計画(BCP)の策定が進められてきていますが、こうしたBCPは、地域における災害ごとの発生頻度や、企業活動における電力、ガス、石油等の利用状況、地域のエネルギーインフラの特性を踏まえたものとなっていないことも多く、実際の被災時には必ずしも有効に機能しないなど、改善の余地が大いにあります。ある企業では受電設備の耐震化を進め、比較的地震の影響が少ないという理由で受電設備を地下に設置していたため、予想を超える豪雨で浸水が生じた際には受電設

<sup>4</sup> Allianz, AXA, Zurich Insurance Group等の保険会社、アセットマネジメント会社が参加し、議論が進められています。

<sup>5</sup> Munich Re, Munich, Swiss Re, Stanford University等の保険会社や金融機関、学術機関の参加を得て議論を進めています。

備が完全に水没し、電力会社による電力供給は途絶えていないにもかかわらず、受電できないために生産活動が停止したという例もあります。

ただし、想定し得る全ての災害に備えることは多額の費用が必要となるため、経済的に現実的ではありません。地域における災害ごとの発生頻度や、企業活動における電力、ガス、石油等の利用状況、地域のエネルギーインフラの特性を踏まえ、優先順位を付けて対応していくことが必要になります。また、こうした取組に円滑に資金が供給されるためにも、エネルギーレジリエンス向上が災害対応力に止まらず平時も含む企業経営全般にとってプラスになることを定量的に示し、金融面でも適切に評価されるようにすることが重要であり、そのためにはエネルギーレジリエンスを概念だけでなく具体的・定量的に捉えていく必要があります。

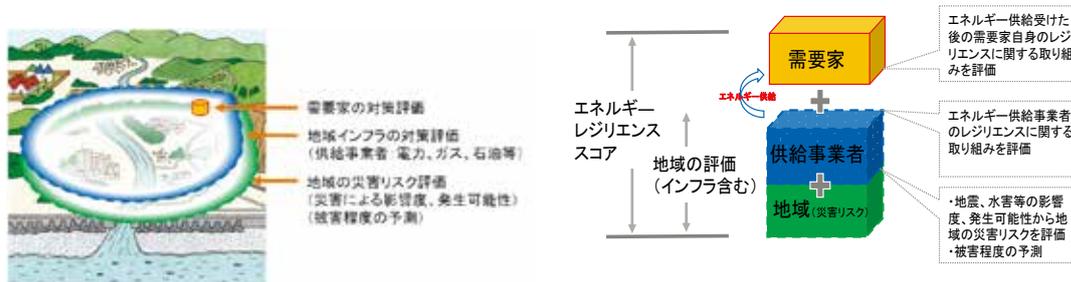
こうした考えの下、2020年にエネルギーの需要家（IT産業や不動産業）、エネルギー産業、金融業、アカデミアを中心とした「エネルギーレジリエンス協議会」が発足し、日本経済団体連合会を始めとした関連団体や金融庁、経済産業省等の関係省庁も参加して議論が進められており、2020年11月にはエネルギーレジリエンスの定量評価の重要項目を明確化した「エネルギーレジリエンスフレームワーク」が取りまとめられました<sup>6</sup>（第132-2-6、第132-2-7、第132-2-8）。

【第132-2-6】エネルギーレジリエンス定量評価指標のフレームワーク

| 「平時の予防活動」と「非常時の迅速な停止状態からの復旧」により、持続可能な成長に貢献する |               |                         |                              |
|--|---------------|-------------------------|------------------------------|
| NO   | 重要項目（大項目）     | 重要項目（中項目）               | 定量評価項目                       |
| ①  | 代替性のあるエネルギー調達 | エネルギー種別の多様性             | エネルギー種別の数                    |
|  |               | 個別エネルギー源の多様性            | 燃料調達先の多様性                    |
|  |               |                         | 備蓄による備え                      |
|  |               |                         | 供給方法の多様性                     |
| ②  | イノベーション・設備投資  | 各指標を飛躍的に高めるイノベーション・設備投資 | 各指標を飛躍的に高めるイノベーションの取組        |
|  |               |                         | 需要家における各指標を飛躍的に高めるイノベーションの導入 |
| ③  | 流通網の強靱性       | 流通網の強靱性                 | 流通網の信頼性                      |
|  |               | 設備の強靱性                  | 前提となる災害の想定                   |
|  |               |                         | 自然災害に対応した設備設計                |
| ④  | 非常時の備え        | エネルギー途絶時の自立性の確保         | 非常時の供給方法の多重性                 |
|  |               |                         | 非常時設備の運転信頼性                  |
|  |               | 非常時の想定と備蓄               | 非常時のための備蓄                    |
|  |               |                         | 非常時を想定した備え                   |
|  |               | BCPの策定と着実な運用            | 実効性のある対策と訓練の実施               |
|  |               |                         | 災害時の情報発信                     |
| サイバーセキュリティ                                   |               |                         |                              |

出典：第2回 エネルギーレジリエンス協議会資料より抜粋

【第132-2-7】エネルギーレジリエンススコアの考え方



出典：第2回 エネルギーレジリエンス協議会資料より抜粋

<sup>6</sup> 代表幹事である東京大学小宮山涼一准教授に加え、金融界から荻野零児・三菱UFJモルガン・スタンレー証券（株）シニアアナリスト、木村彰宏・損害保険ジャパン（株）ビジネスデザイン戦略部長、竹田達哉（株）三井住友銀行 サステナビリティ推進室長、蛭間芳樹（株）日本政策投資銀行 産業調査部 調査役、産業界から坂梨興・大阪ガス（株）執行役員・企画部長、鈴木真吾・三井不動産（株）執行役員ビルディング本部副本部長、岸野寛・東京ガス（株）専務執行役員 総合企画担当、谷口直行・NTTアノードエナジー（株）取締役スマートエネルギー事業部長、中原俊也・ENEOS（株）常務執行役員、長崎桃子・東京電力ホールディングス（株）常務執行役、渡部正治・三菱重工業（株）シニアフェロー・パワードメイン技師長、工藤拓毅・日本エネルギー経済研究所 理事、安部大介（株）ウェザーニューズ 執行役員 サービス統括主責任者、高須芳彦・リンナイ（株）海外事業本部 副本部長、オブザーバーとして長谷川雅巳（一社）日本経済団体連合会 環境エネルギー本部長、宮田卓・電気事業連合会立地環境部長、須藤 幸郎・石油連盟企画部長、深野行義（一社）日本ガス協会企画ユニット環境部長、池田賢志・金融庁 総合政策局 チーフサステナブルファイナンスオフィサーの参加を得て議論を進めています（2021年3月31日時点）。

第3章 エネルギーセキュリティの変容

【第132-2-8】エネルギーレジリエンス評価指標一覧

|                  |                       | 項目  |   |
|------------------|-----------------------|---|---|
| 地域               | 災害リスク評価               | 地震  | 発生可能性<br>影響度（ハザードによる深刻の度合い・規模）<br>被害程度の予測（地域内の建物や道路等の損壊程度の予測） |
|                  | 台風                    | 発生可能性<br>影響度（ハザードによる深刻の度合い・規模）<br>被害程度の予測（地域内の建物や道路等の損壊程度の予測）   |   |
|                  | 洪水                    | 発生可能性<br>影響度（ハザードによる深刻の度合い・規模）<br>被害程度の予測（地域内の建物や道路等の損壊程度の予測）   |   |
| 電力               | 代替性のあるエネルギー調達         | 多様なエネルギー源による電源ポートフォリオ形成の有無<br>エネルギー源の地域分散配置（太平洋側&日本海、東日本&西日本など）の有無<br>需給ひっ迫や緊急電力需要への対応策の有無；需給調整の予備力・調整力の確保、制御の実効性<br>（他電源の購入有無も含む）  |   |
|                  | イノベーション・設備投資          | 他電力融通等の協力体制の有無<br>エネルギー安定供給に向けた設備投資、新システム導入の有無（配電自動化機器の拡大、デジタル変電所等）<br>設備を必要時に稼働させる訓練の有無  |   |
|                  | 流通網の強靱化               | SAIDI（System Average Interruption Duration Index）：需要家1軒当たりの平均停電時間<br>SAIFI（System Average Interruption Frequency Index）：需要家1軒当たりの平均停電回数   | 訓練の回数   |
|                  | 非常時の備え                | 災害対策の有無（耐震化、水害対策、等）<br>BCP、災害対策マニュアル策定の有無<br>BCP、災害対策マニュアルの実効性を高めるための訓練の有無<br>訓練の場合   | 訓練の回数<br>訓練の内容<br>訓練への参加機関数（他機関の要請等での参加含む）                    |
| 供給事業者            | 代替性のあるエネルギー調達         | 【都市ガス】<br>【LPガス】<br>調達先の分散化（LNG）・融通体制の有無  |   |
|                  | イノベーション・設備投資          | 【都市ガス】<br>スマートエネルギーネットワークの展開の有無。<br>※停電対応型設備（エネファーム、コージェネ）、分散型エネルギー施設の導入が挙げられる（需要家側の近くで発電するといった考え方）   |   |
|                  | 流通網の強靱化               | 【都市ガス】<br>ガス導管の耐久性・LNG基地の災害対策の有無（耐震化の有無、台風、津波への対策）  |   |
|                  | 非常時の備え                | 【都市ガス】<br>【LPガス】<br>設備の冗長性の取り組みの有無<br>例：製造設備の冗長性として予備機を保有していること、また供給設備の冗長性として（供給区域全体ではないもの）導管網がループ化されていることや臨時供給が可能であること<br>【都市ガス】<br>供給地域のブロック化の有無<br>【LPガス】<br>貯蔵施設の対策（地震、水害対策）の有無<br>【都市ガス】<br>【LPガス】<br>BCP、災害対策マニュアル策定の有無<br>【都市ガス】<br>【LPガス】<br>ガス事業者間における保安の確保のための連携及び協力に関するガイドラインに沿った対応の有無<br>【都市ガス】<br>【LPガス】<br>BCP、災害対策マニュアルの実効性を高めるための訓練の有無<br>【都市ガス】<br>【LPガス】<br>訓練の場合<br>【都市ガス】<br>【LPガス】<br>BCP第三者評価の実施の有無 | 訓練の回数<br>訓練の内容<br>訓練への参加機関数（他機関の要請等での参加含む）                    |
| 石油               | 代替性のあるエネルギー調達         | 国内消費量に対する国内生産量の割合<br>（※平時においても輸入が主体となっているナフサを除いた値を指標とする）  |   |
|                  | イノベーション・設備投資          | 国内消費量に対する備蓄日数<br>A1設備投資、エネルギーコスト低減の取組、省人化などの取り組みの有無<br>例：製油所の操業、保安関係、サプライチェーン全体のトランスフォーメーション、コロナ感染対策を踏まえ製油所での出社人口を抑えるための機械化、等   |   |
|                  | 流通網の強靱化               | 非常用電源を備えた製油所・油槽所数の割合<br>非常用電源を備えたSS数の割合   |   |
|                  | 非常時の備え                | 製油所等の耐震強化、耐凍化対策等を実施するにあたって想定した地震（地震動の大きさ）<br>系列BCP、災害対策マニュアル策定の有無<br>BCP、災害対策マニュアルの実効性を高めるための訓練の有無<br>訓練の場合   | 訓練の回数<br>訓練の内容<br>訓練への参加機関数（他機関の要請等での参加含む）                    |
| 水道・行政施設（下水道・道路等） | 非常時の備え（上水道）           | 市町村のBCP、災害対策マニュアル策定の有無（行政施設、道路等への対策の有無）<br>BCP、災害対策マニュアルの実効性を高めるための訓練の有無<br>訓練の場合   | 訓練の回数<br>訓練の内容<br>訓練への参加機関数（他機関の要請等での参加含む）                    |
|                  | 非常時の備え（行政施設（下水道・道路等）） | 下水道（都道府県、市町村等）のBCP、災害対策マニュアル策定の有無<br>BCP、災害対策マニュアルの実効性を高めるための訓練の有無<br>訓練の場合   | 訓練の回数<br>訓練の内容<br>訓練への参加機関数（他機関の要請等での参加含む）                    |
|                  |                       |   |   |
|                  |                       |   |   |
| 需要家              | 複数のエネルギー確保の検討         | エネルギー確保のリスクアセスメント実施の有無（複数のエネルギー（電力、ガス、石油、水素等）保有を供給事業者に相談しながら検討しているか）  |   |
|                  | 電力                    | 発電設備の耐震化、地域の分散型電源（再生エネ、蓄電池、電動車等）、停電対応型設備（エネファーム、コージェネ）の導入の有無（自社内の電力受け入れ設備への対策を供給側と相談して導入しているか）<br>電力供給停止時の自社内の代替手段による継続日数   |   |
|                  | ガス                    | 災害時の供給網との連携体制の有無（災害協定の締結など）<br>中圧配管が利用の有無<br>自社のガス管の耐震化、LPガス容器の転倒防止策等の有無（自社のガス受け入れ設備への対策を供給側と相談して導入しているか）<br>ガス供給停止時の自社内の代替手段による継続日数（都市ガス等の供給停止時に、エネルギー源としてLPガスを有効活用する等）  |   |
|                  | 石油                    | 災害時の供給網との連携体制の有無（災害協定の締結など）<br>保管場所の耐震化等の有無（自社の石油備蓄設備への対策を供給側と相談して導入しているか）<br>車の燃料メーターが半分程度になったら満タンにする取り組みの有無<br>石油の自衛的備蓄の有無（何日分か）<br>災害時の供給網との連携体制の有無（災害協定の締結など）   |   |
|                  | 上水                    | 自社の水道管の耐震化等の有無（自社の上水受け入れ設備への対策を供給側と相談して導入しているか）<br>上水の自衛的備蓄の有無（何日分か）  |   |
|                  | 設備・BCP・訓練等            | 施設・設備のリスクアセスメント実施の有無（地震、水害等に備えた脆弱性評価）<br>施設・設備等への対策実施の有無（地震、水害等に備えたハード対策）<br>BCP、災害対策マニュアル策定の有無<br>BCP、災害対策マニュアルの実効性を高めるための訓練の有無<br>訓練の場合   | 訓練の回数<br>訓練の内容<br>訓練への参加機関数（他機関の要請等での参加含む）                    |
|                  |                       | 財務体制（保険等）の取組の有無<br>BCP第三者評価の実施の有無   |   |
|                  |                       |   |   |
|                  |                       |   |   |
|                  |                       |   |   |

※供給事業者の評価指標は、業界団体ごとにレジリエンスを示す指標の種類や内容が様々であり、実態にあった形で評価することが求められることから、共通・代表的な指標でなく、エネルギー種ごとに4つの区分でレジリエンスを評価できる指標をそれぞれ設定した。  
※評価指標は、各業界団体と協議をしながら検討が望まれる。

出典：第2回 エネルギーレジリエンス協議会資料より抜粋

### 3. 再生可能エネルギーの大量導入とデジタル化による影響

#### (1) 電力システムに対するサイバー攻撃の増加

電力システムのデジタル化により、効率性の向上とコストの削減、停電時間の短縮など、エネルギーシステム全体にとって大きな便益が生まれる可能性があります。特に、系統運用のデジタル化が進めば、需給調整の高度化を通じて、従来ならば出力抑制していた太陽光・風力等を活用していくことも可能になります。

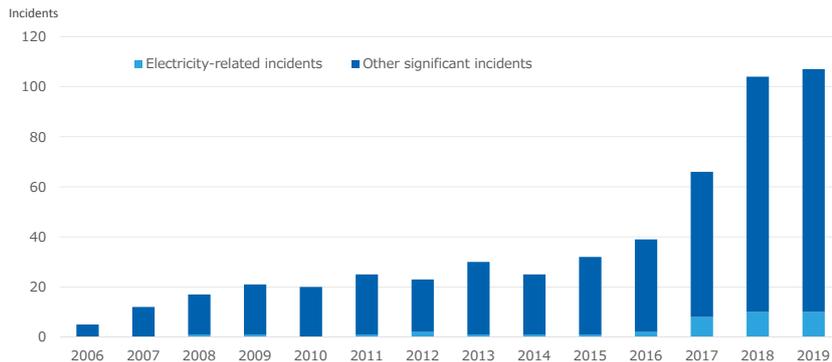
一方で、電源や系統、EVを含む蓄電池がデジタル制御され、つながることにより、電力システム全体が潜在的なサイバー攻撃リスクを背負うことになることにも十分な留意が必要です。実際に、2010年には20件であった電力システムに対するサイ

バー攻撃の件数は、デジタル化が進展した2017年以降急増し、2019年に100件を超えるなど、過去10年で5倍以上に急増しており、十分な備えが必要です(第132-3-1)。

#### (2) 電力システムに対するサイバー攻撃の質の変化

電力システムに対するサイバー攻撃の事例を見ると、企業や国家の情報窃取等を目的とした攻撃に止まらず、電力供給途絶を招くような深刻な攻撃も見られるようになってきています。大規模停電に至れば、国民の生命・財産を脅かしかねません。我が国においても、国民の安全に責任を持つ政府と、電力の安定供給に責任を持つ事業者が連携し、サイバー攻撃対策に積極的に取り組む必要があります(第132-3-2)。

【第132-3-1】電力システムに対するサイバー攻撃の件数推移



出典：IEA「Power Systems in Transition」

【第132-3-2】近年発生した電力分野の主要なセキュリティインシデント

|                                   |  |   |   |
|-----------------------------------|--|---|---|
| 電力分野の主要セキュリティインシデント               | <b>風力タービンの技術流出 (アゼルバイジャン、'20)</b>  | 風力タービンの集中監視・制御システムの取得を目的としたトロイの木馬 (RAT)によるサイバー攻撃が、アゼルバイジャンの公共部門・民間企業に対して実行された。        |  |
|                                   | <b>原子力委員会への不正アクセス (パキスタン、'21)</b>  | インドのハッカーによるパキスタン原子力委員会メンバーに対する、モバイルマルウェアを使用した不正情報アクセスが行われた。                           |   |
|                                   | <b>電力ネットワーク設備への妨害攻撃 (米、'19)</b>  | 電力ネットワーク管理システムの脆弱性をついた攻撃により、発電所等に設置されたネットワーク機器が強制再起動を繰り返し、通信障害が発生した。                  |   |
|                                   | <b>インフラ事業者へのハッキング (ドイツ、'20)</b>  | ロシアのハッキンググループがドイツの電力会社のネットワークを攻撃、サイバーセキュリティ上危険な状態になっていたことが確認された。                      |   |
| <b>変電所へ標的型マルウェア攻撃 (ウクライナ、'16)</b> | 事務系システムから侵入したマルウェアCrashOverrideによって、変電所のブレーカーが不正に遮断、停電が発生した。マルウェアには電力分野で広く用いられる産業用制御プロトコルに対応した様々な機能が実装されていた。 |  |   |
| <b>太陽光発電インバータに複数の脆弱性 (独、'17)</b>  | 独SMA社のPVインバータに関連した14件の脆弱性が報告された。機器乗っ取りを可能とする脆弱性が含まれ、電源大量離脱の可能性が指摘された。SMA社は一部に反論しつつ、深刻な脆弱性の修正を実施した。           |   |  |

出典：CSIS「Significant Cyber Incidents Since 2006」より経済産業省作成

## 4. 脱炭素化とエネルギーセキュリティの両立

### (1) 次世代燃料の可能性

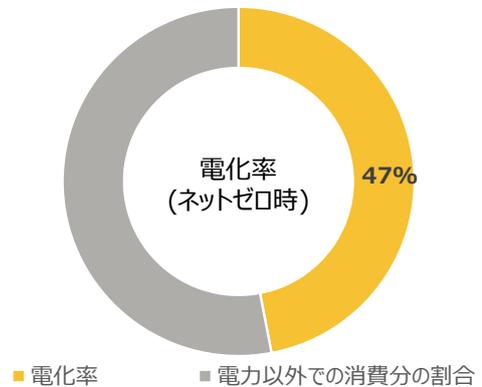
カーボンニュートラル実現時のエネルギー需給構造の在り方については複数の可能性があります。IEAの予測によれば、世界全体の電化率は、カーボンニュートラル実現段階でも47%に止まり、残り53%は熱に対する需要だとされています<sup>7</sup>(第132-4-1)。熱需要のうち、特に大きな割合を占めるのが鉄鋼や化学等の産業部門における高温の熱需要です。

こうした熱需要の脱炭素化に貢献すると期待されているのが、水素やアンモニアといった次世代の脱炭素燃料であり、我が国のみならず、欧州を始め世界中で実用化に向けた研究開発や実証が精力的に進められています。水素やアンモニアの製造方法は複数存在しますが、脱炭素燃料として製造する場合には、再生可能エネルギーによる水の電気分解や、化石燃料の改質とCO<sub>2</sub>の分離回収(CCUS)を組み合わせた手法が有力です(第132-4-2)。

日本では、世界に先駆けて「水素社会」を実現するべく取り組んでいます。大量の水素を安価、安定的に調達するには、国内における水電解装置等による水素製造に加えて、再生可能エネルギーやCCUSのコストが安い海外で水素を製造し、大量に輸送することも有力な選択肢となります。水素を大量に貯蔵し、長距離を輸送する技術も複数存在し、液化水素、有機ハイドライド、アンモニアの3つが有力と

されますが、それぞれに長所・短所があり、社会実装に向けた研究開発・実証段階にあります。再生可能エネルギーが豊富なドイツなども、将来必要となる水素を自国でまかなうのみならず海外から輸入することに関心を示しています。このような中、我が国の脱炭素化はもちろん、産業競争力の強化にもつなげるため、水素を「つくる」「はこぶ」「つかう」技術を我が国が早期に確立・商用化していくことが重要です。政府としては、グリーンイノベーション基金等も活用しながら、民間企業の取組を強力に後押ししていきます(第132-4-2)。

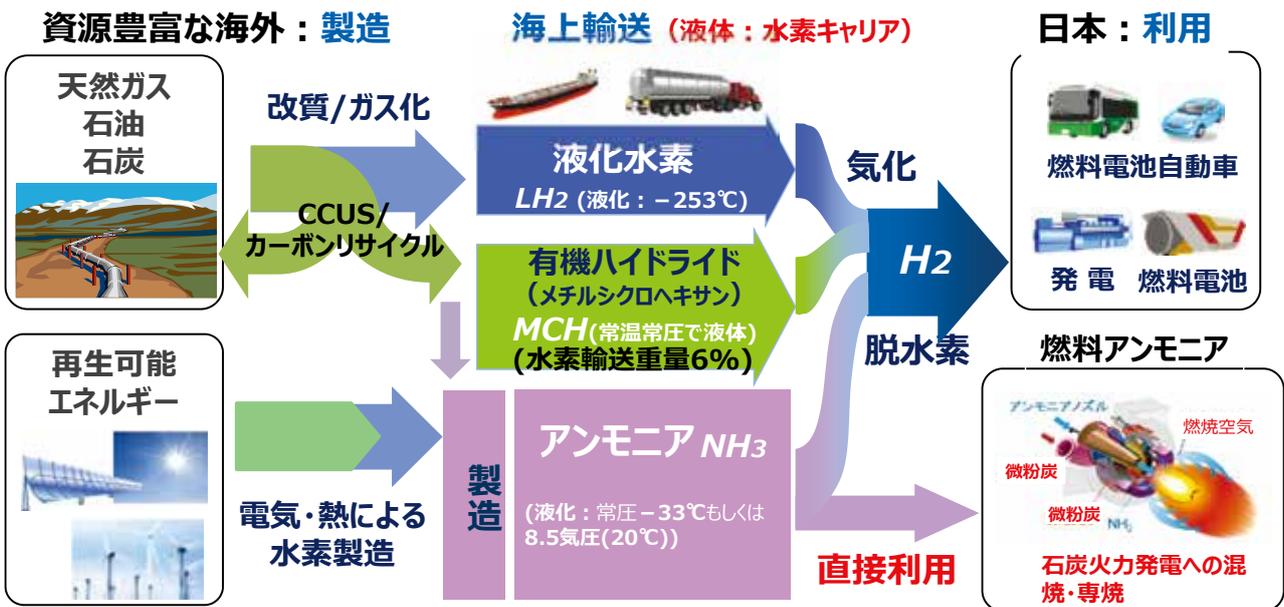
【第132-4-1】温室効果ガス排出量ネットゼロ段階での世界の電化率見通し



(注) グラフはIEA「World Energy Outlook 2020」SDSシナリオベース  
(注) 電化率=最終エネルギー消費に占める電力消費の割合

出典：IEA「Energy Technology Perspectives 2020」より経済産業省作成

【第132-4-2】次世代燃料のセキュリティ



出典：総合資源エネルギー調査会第35回基本政策分科会資料より抜粋

<sup>7</sup> 最終エネルギー消費に占める電力消費の割合を示します。

C O L U M N

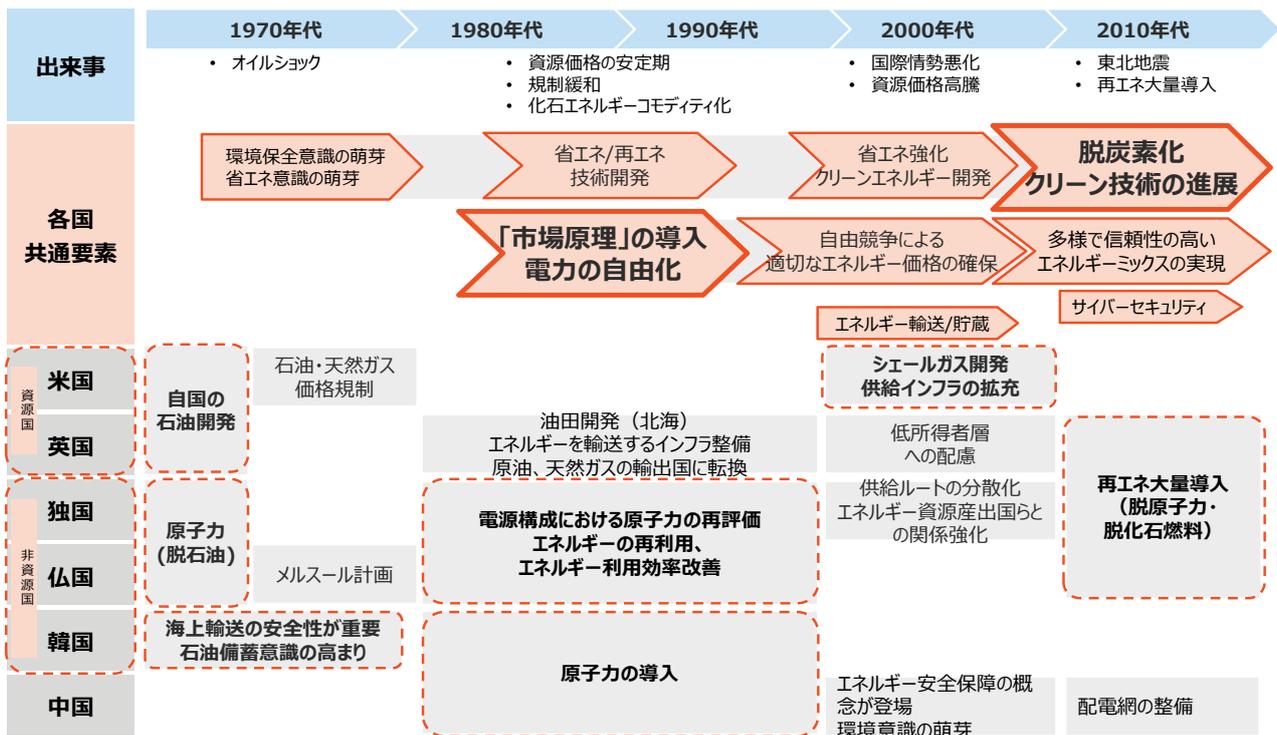
諸外国のエネルギー政策文書等から見るエネルギーセキュリティの重点の変遷

諸外国(英・米・仏・独・中・韓)について、政府文書等におけるエネルギーセキュリティに関する記載を抜き出し、重点的に記載されている内容を時系列で整理すると、その国が自国に化石燃料資源を豊富に有するかどうかによって、エネルギーを巡る情勢変化への対応が分かれることが見えてきます。

例えば、石油危機後の1970年代には、国内に化石燃料資源を有する米国や英国では、まずは国内資源開発を通じてエネルギー安全保障の強化に取り組んでいますが、資源に乏しいフランスやドイツでは、石油危機を契機に原子力開発を加速させています。また、同じく小資源国の韓国も1978年の古里原子力発電所運転開始を皮切りに、1980年代・1990年代にわたり、原子力発電所の建設を積極的に進めることとなります。

1980年代半ば以降は資源価格が下落し、規制緩和が進み、市場原理の導入に力点が置かれていましたが、2000年代に入ると、資源価格の高騰に伴って再びエネルギー安全保障が重視されるようになります。国内に化石燃料資源を有する米国では再び国内資源開発が進みましたが、エネルギー安全保障に加えて気候変動対策への意識も高まっていた欧州では、その両方に資する再生可能エネルギーの開発が資源国・非資源国問わず、進められることとなりました(第132-4-3)。

【第132-4-3】諸外国の政策文章等から見るエネルギーセキュリティの重点の変遷



出典：(株)日本総合研究所「令和2年度エネルギー需給構造高度化対策に関する調査等委託事業(エネルギーに影響を与える国内外の経済社会動向に関する調査)」(2021年3月)

C O L U M N

スーパーメジャー各社における脱炭素時代の事業戦略

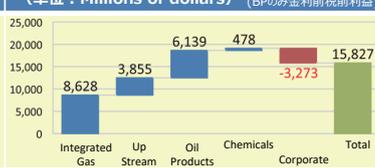
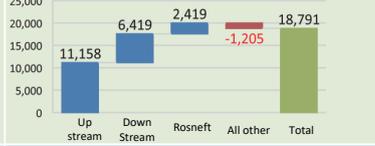
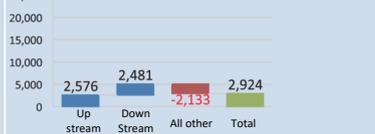
原油の探鉱・開発・生産・輸送・精製・販売までを一貫してグローバルかつ大規模に展開してきたスーパーメジャー<sup>8</sup>も、昨今の世界的なカーボンニュートラルの流れや拡大するESG投資の動向を受けて、事業戦略の転換を進めており、伝統的に事業の柱であった化石燃料に関する投資額の削減や、電力小売、再エネ、水素等への新分野への進出等を目指して掲げる企業が出てきています(第132-4-4)。

ただし、現在のスーパーメジャーの収益の中心は、依然として原油事業であることから、目標の実現には抜本的な事業転換が必要となります。具体的に各社がどのように対応しようとしているのか、それぞれの投資動向を分析すると、各社のアプローチは大きく異なっていることが見て取れます。

例えば、天然ガス・LNG事業に強みを有する英蘭Shellと仏TOTALは、脱炭素社会への「移行」期間に稼ぐことを念頭に、石油から天然ガス・LNG事業等へのポートフォリオ転換を進めています。天然ガス・LNGは、化石燃料の中では比較的二酸化炭素の排出量が少なく、証書を活用したカーボンニュートラルLNGの販売も始まっています。また天然ガス・LNG発電は柔軟性が高いため天候に左右される太陽光や風力発電のバックアップ電源として機能するなど、カーボンニュートラルに向けた「移行」期間においては引き続き一定の存在感を有する資源になると見込まれています。一方で、英BPは脱石油ビジネスと再エネへの事業転換を他社以上急速に進めています。対照的に、米Chevronは、長期的な石油・天然ガスの世界需要は拡大するという見立てから、CCSやバイオ燃料に投資しながらも、引き続き上流開発を強化しようとしています。

世界全体のカーボンニュートラルに向けた取組と石油需要の縮小がどのくらいの速度で進むのかによって、スーパーメジャー各社間の今後の相対的な優位性が大きく変化することになりそうです。

【第132-4-4】スーパーメジャー各社における脱炭素時代の事業戦略の概要

| 企業名   | 利益構成(2019年実績)<br>(単位: Millions of dollars) <small>各社の部門別純利益 (BPのみ金利前税前利益)</small>   | 長期戦略 | 脱炭素に向けた足元の対応             |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
|---|---|------|--------------------------|--------------------------|--------|-----------------------------------|-------|----------------------|--------|----------------------|--------------|---|---|--|--|--|--|
| <br>英蘭Shell  |  <table border="1"> <tr><th>部門</th><th>利益 (Millions of dollars)</th></tr> <tr><td>Integrated Gas</td><td>8,628</td></tr> <tr><td>Up Stream</td><td>3,855</td></tr> <tr><td>Oil Products</td><td>6,139</td></tr> <tr><td>Chemicals</td><td>478</td></tr> <tr><td>Corporate</td><td>-3,273</td></tr> <tr><td><b>Total</b></td><td><b>15,827</b></td></tr> </table>                             | 部門   | 利益 (Millions of dollars) | Integrated Gas           | 8,628  | Up Stream                         | 3,855 | Oil Products         | 6,139  | Chemicals            | 478          | Corporate   | -3,273  | <b>Total</b>   | <b>15,827</b>  | 当面天然ガス・石油化学に投資しつつ再エネ・CCSの成長機会も追及して長期的なポートフォリオのバランスを目指すアプローチ。向こう数十年は石油・天然ガス事業を継続。 | 設備投資の42%を上流開発事業に充当するが2025年以降は25-30%に削減。代わって電力小売・再エネ・水素・売燃料を現状の16%から2025年以降は35%-40%まで増加させる。 |
| 部門  | 利益 (Millions of dollars)  |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| Integrated Gas  | 8,628   |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| Up Stream   | 3,855   |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| Oil Products  | 6,139   |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| Chemicals   | 478   |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| Corporate   | -3,273  |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| <b>Total</b>  | <b>15,827</b>   |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| <br>英BP  |  <table border="1"> <tr><th>部門</th><th>利益 (Millions of dollars)</th></tr> <tr><td>Up stream</td><td>11,158</td></tr> <tr><td>Down Stream</td><td>6,419</td></tr> <tr><td>Rosneft</td><td>2,419</td></tr> <tr><td>All other</td><td>-1,205</td></tr> <tr><td><b>Total</b></td><td><b>18,791</b></td></tr> </table>  | 部門   | 利益 (Millions of dollars) | Up stream                | 11,158 | Down Stream                       | 6,419 | Rosneft              | 2,419  | All other            | -1,205       | <b>Total</b>  | <b>18,791</b>   | ロスネフチを除く石油・天然ガス生産量を現状260万boedから2030年150万boedに削減。再エネ投資を2020年5億ドルから、2025年40億ドル、2030年50億ドルへ拡大 | 炭化水素の生産量削減、石油化学事業の売却、天然ガス液化設備への資本投資節約等、化石燃料に関わる設備投資削減を実施中。2025年までの設備投資のうち石油・天然ガス開発を50%以下に。     |  |  |
| 部門  | 利益 (Millions of dollars)  |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| Up stream   | 11,158  |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| Down Stream   | 6,419   |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| Rosneft   | 2,419   |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| All other   | -1,205  |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| <b>Total</b>  | <b>18,791</b>   |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| <br>仏TOTAL<br><small>※TOTALは天然ガス、LNG事業と再エネ事業の部門を統合</small> |  <table border="1"> <tr><th>部門</th><th>利益 (Millions of dollars)</th></tr> <tr><td>Exploration &amp; Production</td><td>7,509</td></tr> <tr><td>Integrated Gas, Renewable &amp; Power</td><td>2,389</td></tr> <tr><td>Refining &amp; Chemicals</td><td>3,003</td></tr> <tr><td>Marketing &amp; Services</td><td>1,653</td></tr> <tr><td><b>Total</b></td><td><b>14,554</b></td></tr> </table> | 部門   | 利益 (Millions of dollars) | Exploration & Production | 7,509  | Integrated Gas, Renewable & Power | 2,389 | Refining & Chemicals | 3,003  | Marketing & Services | 1,653        | <b>Total</b>  | <b>14,554</b>   | 脱炭素に向けた移行期間の長短の予測が困難なため、石油・天然ガスのキャッシュフローをLNG・再エネ投資にシフト。                                    | LNG・再エネへの事業転換を行っており、2030年の売上構成を石油35%、天然ガス50%、石油35% (バイオ燃料含む)とする。証書を用いたカーボンニュートラルLNGの取り組み等を実施中。 |  |  |
| 部門  | 利益 (Millions of dollars)  |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| Exploration & Production  | 7,509   |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| Integrated Gas, Renewable & Power   | 2,389   |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| Refining & Chemicals  | 3,003   |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| Marketing & Services  | 1,653   |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| <b>Total</b>  | <b>14,554</b>   |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| <br>米Chevron   |  <table border="1"> <tr><th>部門</th><th>利益 (Millions of dollars)</th></tr> <tr><td>Up stream</td><td>2,576</td></tr> <tr><td>Down Stream</td><td>2,481</td></tr> <tr><td>All other</td><td>-2,133</td></tr> <tr><td><b>Total</b></td><td><b>2,924</b></td></tr> </table>  | 部門   | 利益 (Millions of dollars) | Up stream                | 2,576  | Down Stream                       | 2,481 | All other            | -2,133 | <b>Total</b>         | <b>2,924</b> | 長期的にも石油・天然ガスの需要は拡大する見通しを前提にポートフォリオ構築を進める。CCS・バイオ燃料技術等への投資も実施。 | 引き続き、米国のバーミアンやカザフスタンのテンギス油田等の上流開発に注力。買収した東地中海ガス田開発などの長期的な企業価値向上も上流開発が中心の位置付け。 |  |  |  |  |
| 部門  | 利益 (Millions of dollars)  |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| Up stream   | 2,576   |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| Down Stream   | 2,481   |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| All other   | -2,133  |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |
| <b>Total</b>  | <b>2,924</b>  |      |                          |                          |        |                                   |       |                      |        |                      |              |   |   |  |  |  |  |

出典：JOGMEC「メジャー企業2020年第3四半期決算とエネルギートランジション戦略について」と各種公表情報より経済産業省作成

8 米ExxonMobil、英蘭Shell、英BP、米ConocoPhillips、米Chevron、仏Totalの6社を指します。

## 第3節 構造変化を踏まえた エネルギーセキュリティの評価

### 1. エネルギーセキュリティを構成する要素

#### ①エネルギーセキュリティの定量評価に関する国際的な動向

経済協力開発機構(以下、「OECD」という。)が2018年に発行した「The Full Costs of Electricity Provision」では、エネルギーセキュリティを構成する要素を、外的要素と内的要素の2側面に分けて整理しています。外的要素とは、一次エネルギーに伴う地政学的な要素を指します。内的要素は、その国における経済、財政、技術的な要素を指します。

こうした整理を念頭に、エネルギーセキュリティを定量的に評価しようという試みは、国際機関でも行われてきました。OECDの専門機関である原子力機関(以下、「OECD/NEA」という。)が2010年に公表した「The simplified supply and demand index」(以下、「SSDI」という。)が一つの例です。これは、IEAのエネルギー統計を基に、エネルギー需要・社会インフラ・エネルギー多様性・輸入先多様化・省エネルギー性等を考慮した統合した指標となっています(第133-1-1)。

SSDIは「各項目のウェイトを各国の好みにアレン

ジでき、透明性の高い手法だ<sup>9)</sup>とされていますが、同時に「過去10年間のエネルギー需給構造の変化を考慮しておらず、水力以外の、太陽光や風力発電等の再生可能エネルギー源が含まれていない。(今後のエネルギーセキュリティの評価には)自然変動電源が電力システムに与える影響を考慮する必要がある」という限界があるとされています。

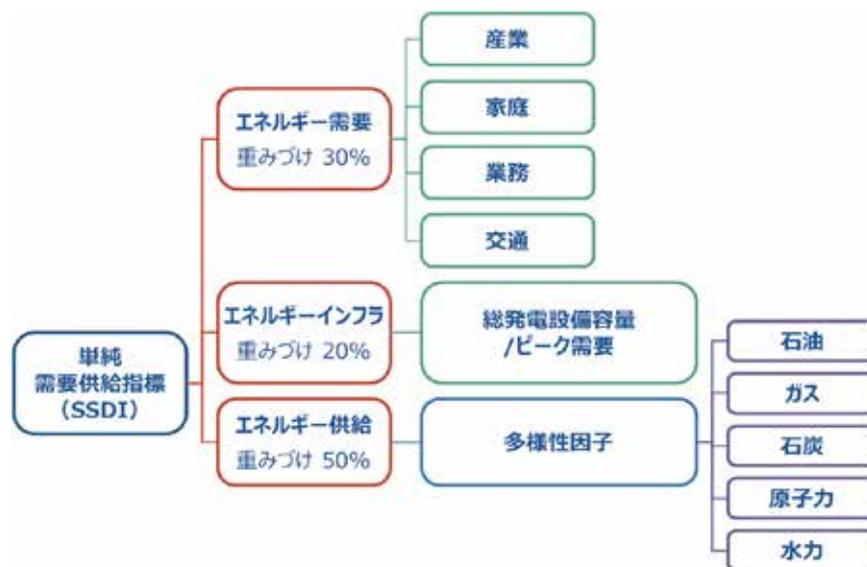
#### ②我が国におけるエネルギーセキュリティの定量評価の試み

これまでのエネルギー白書においても、エネルギーセキュリティの定量評価に取り組んできています。

例えば、「エネルギー白書2010」では、エネルギーセキュリティを「国民生活、経済・社会活動、国防等に必要量のエネルギーを受容可能な価格で確保できること」と定義した上で、独自の定量評価指標(以下、「エネルギー安全保障の定量評価指標」という。)を示しています。エネルギー安全保障の定量評価指標では、エネルギーセキュリティを構成する要素を「国外からの資源調達」、「国内供給」、「国内消費」の三段階に分けて考えるとともに、サプライチェーン全体を支える要素として「供給途絶への対策」についても評価しています。

また「エネルギー白書2015」では、米国のいわゆる「シェール革命」によって世界のエネルギー情勢が大きく変化したことを踏まえ、「エネルギー白書

【第133-1-1】SSDIを構成する要素



出典：OECD(2018)「The Full Costs of Electricity Provision」より経済産業省作成

9 OECD(2018)「The Full Costs of Electricity Provision」

【第133-1-2】点数化の方法(評価数値が大きいほど良い評価となる項目)

|   | 評価数値 | 点数   |                                       |
|---|------|------|---------------------------------------|
| A | 100  | 10.0 | 最も評価数値が大きいので10点                       |
| B | 10   | 1.0  | 式を適用・・・ $(10 \div 100) \times 10 = 1$ |
| C | 20   | 2.0  | 式を適用・・・ $(20 \div 100) \times 10 = 2$ |
| D | 50   | 5.0  | 式を適用・・・ $(50 \div 100) \times 10 = 5$ |
|   |      |      | 式 = (自身の評価数値 ÷ 最も良い評価数値) × 10         |

2010」で示した「エネルギー安全保障の定量評価指標」を用いて、世界各国のエネルギーセキュリティの定量評価結果を更新して示しました。

2020年は、世界が脱炭素に向けて一斉に動き出し、世界のエネルギー情勢が再び大きく動いた年でした。このため、「エネルギー白書2010」で示した「エネルギー安全保障の定量評価指標」を用い、一部指標について見直しを行った上で、各国のエネルギーセキュリティの定量評価を試みます。

評価項目としては、「一次エネルギー自給率(外的要素)」、「エネルギー輸入先多様化(輸入相手国の分散度)(外的要素)」、「エネルギー源多様度(外的要素)」、「ショックポイントリスクの低減度(中東依存度)(外的要素)」、「電力の安定供給能力(停電時間)(内的要素)」、「エネルギー消費のGDP原単位(内的要素)」、「化石燃料供給途絶への対応能力(石油備蓄)(外的要素)」の7項目を設定しました。

調査対象国としては、「エネルギー白書2010」、「エネルギー白書2015」との比較可能性を確保する観点から、引き続き日本、米国、英国、フランス、ドイツ、中国、韓国の7か国を設定しました。ただし、一部の国については、上記した7つの評価項目のうちデータが入手できないものがあり、その場合は、その国を除外して評価しました。

評価は10点満点で行い、項目ごとに評価の対象となる数値(評価数値)を算出した上で、最も評価数値の良い調査対象国を10点とします。項目によって評価数値が最も大きい国が10点になる場合と、最も小さい国が10点になる場合があります。他の国の点数は、その国の評価数値を、最も評価数値の良い国と比較して算出します。評価数値が大きい方が良い評価となる場合と、小さい方が良い評価となる場合とで算出の仕方が異なりますので、例を挙げながら説明します。

評価数値が大きい方が良い評価となる場合、上の表の中で評価数値が最も大きいAが10点となります。Bの評価数値は10で、最も大きいAの評価数値100と比べると、10分の1となります。これにより、Bの評価はAの10分の1となります。Aの点数は10点なのでBの点数はその10分の1の1点となります。

これを数式にすると、「(自身の評価数値 ÷ 最も良い評価数値) × 10」となります。C、Dについても、この式を用いると、それぞれ2点、5点が点数となります。

下の表のA～Dの評価数値は【第133-1-2】と全く同じですが、評価数値が小さい方が良い評価となる場合には、Bが10点となります。Aの評価数値は100で、最も小さいBの評価数値10と比べると、10倍と

【第133-1-3】点数化の方法(評価数値が大きいほど良い評価となる項目)

|   | 評価数値 | 点数   |                                       |
|---|------|------|---------------------------------------|
| A | 100  | 1.0  | 式を適用・・・ $(10 \div 100) \times 10 = 1$ |
| B | 10   | 10.0 | 最も評価数値が小さいので10点                       |
| C | 20   | 5.0  | 式を適用・・・ $(10 \div 20) \times 10 = 5$  |
| D | 50   | 2.0  | 式を適用・・・ $(10 \div 50) \times 10 = 2$  |
|   |      |      | 式 = (最も良い評価数値 ÷ 自身の評価数値) × 10         |

なります。これはAがBの10倍評価が低いということになるので、Aの評価はBの10分の1と考えます。Bの点数は10点なので、Aの点数はその10分の1の1点となります。

これを数式にすると、「(最も良い評価数値÷自身の評価数値)×10」となります。C、Dについても、この式を用いると、それぞれ5点、2点が点数となります。この手法に基づき、各項目につき調査対象国の直近での定量評価・点数化を行いました<sup>10</sup>。

エネルギーセキュリティは時代とともに変化する動的なものです。点数は調査対象国の中で最も良い点数の国との相対評価で決まることから、最も良い国の点数が大きく変化した場合、日本単独で見ると変化が無いのに、日本の点数が大きく動く場合があることには注意が必要です。

## 2. エネルギーセキュリティ指標 日本の経年評価

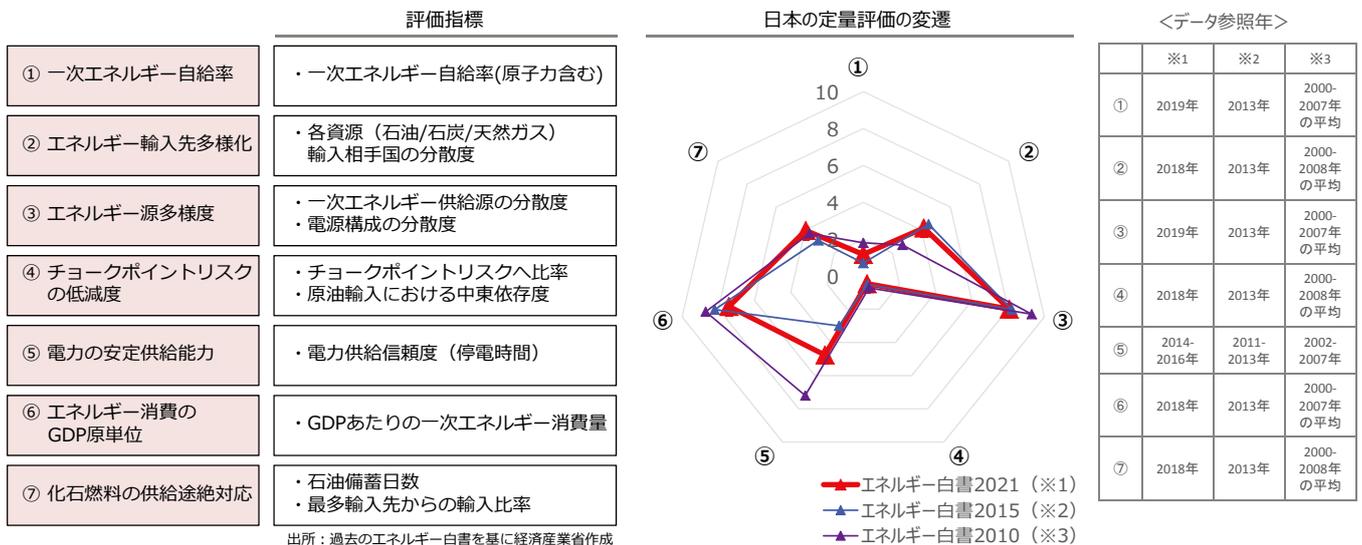
現在入手可能な最新のデータ(【第133-2-1】のデータ参照年を参考)を用いて指標を更新し、日本の経年変化を図にしたものを以下に示します。

エネルギーセキュリティにおいて①一次エネ

ギー自給率、④チョークポイントリスクの低減度、⑦化石燃料の供給途絶対応能力の3点は、諸外国と比較して一貫して低い評価点に留まっています。特に一次エネルギー自給率は、原子力発電所停止の影響で大きく下がっており、再生可能エネルギーの導入等の影響で改善はしているものの、引き続き化石燃料の安定調達、日本のエネルギーセキュリティにとって重要な命題となることが見取れます。

「エネルギー白書2010」、「エネルギー白書2015」での評価と比較して大きく変化しているのが、②エネルギー輸入多様化と⑤電力の安定供給能力(停電時間の長さ)の指標です。②エネルギー輸入多様化については、LNG輸入元の多様化が進んだことで輸入途絶のリスクが減少し、大きく改善しています。⑤電力の安定供給能力(停電時間の長さ)は、東日本大震災の影響によって「エネルギー白書2010」から「エネルギー白書2015」で大きく低下しました。同指標の数値は改善しているものの、「エネルギー白書2010」の水準には戻っていません。カーボンニュートラルを進めれば、エネルギーの電化率は今後一層上昇し、電力安定供給能力(停電時間の長さ)は引き続き重要です。電力システムの強靱化等の災害への備えをさらに進める必要があります。

### 【第133-2-1】日本のエネルギーセキュリティ指標の変化



<sup>10</sup> エネルギー輸入先多様化」や「エネルギー源多様化」のように多様性がエネルギーセキュリティの評価に繋がるものについては、ハーフィンダール・ハーシュマン指数を適用し評価している。この指数は市場の独占度合いを測定する指標の一つで、各国が市場で有するシェアを自乗し、それを加算して算出する。ハーフィンダール・ハーシュマン指数はシェアを自乗して加算するので、シェアの大きな国のシェア変動が大きく影響する。逆に小さな国のシェア変動の影響は小さい。小規模な国の情報を欠いても、指標の有効性が損なわれにくい特徴がある。

### 3. エネルギーセキュリティ指標の各国比較

#### (1) 一次エネルギー自給率

本項では、国際エネルギー機関(IEA)が公表する各国の一次エネルギー自給率を評価数値として点数化しています。自給率が高いほどエネルギーを安価・安定的に確保しやすいことから、自給率が高いほど良い評価となります(なお、IEAは原子力を「準国産エネルギー」と位置付け、一次エネルギー自給率に含めています)。

日本の一次エネルギー自給率を各国と比較すると、2010年、2015年に続き、2020年も低い評価に留まっています。なお、諸外国のうち、大きな動きがあったのが中国です。中国は、2015年時点では最も高い評価を得ていましたが、経済成長に伴うエネルギー需要増で、燃料の海外依存度が上昇し、2020年には大きく点数を落としています。なお、いわゆる「シェール革命」で2015年に大幅に点数を高めた米国や、同じく北海油田の生産量衰退に伴い2015年に大幅に点数を下げた英国は、2020年の評価でも大きな変化は見られませんでした(第133-3-1)。

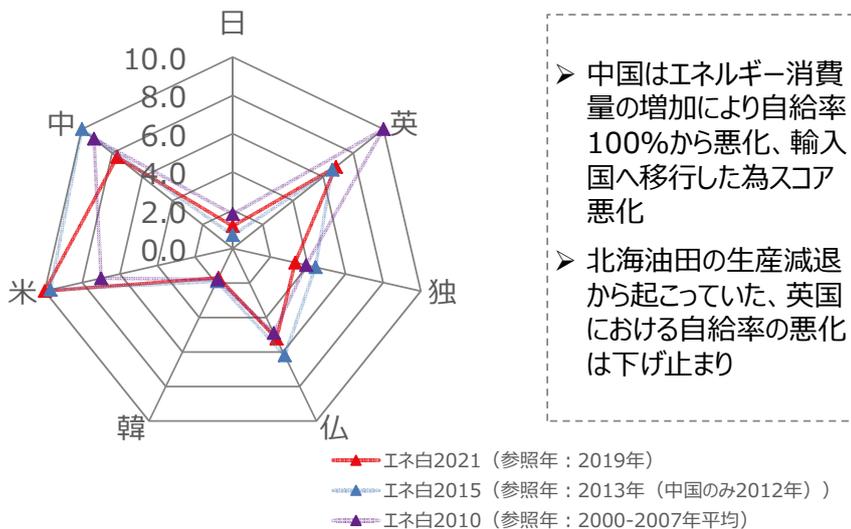
#### (2) エネルギー輸入先多様化

特定の国・地域へのエネルギー依存を低減させることは、エネルギー安全保障の強化に資すると考えられます。ただし、カントリーリスクの高い国・地域へ輸入先を分散していくことは、かえってリスクを高める可能性があります。

本項では、原油・天然ガス・石炭の3種のエネルギー源それぞれにつき、評価対象国における輸入先の寡占度を、OECDの輸出与信データによるカントリーリスクを加味した上で算出しています(通常の寡占度は各国の輸入シェア(%)の2乗を合計しますが、本項の寡占度は過去のエネルギー白書2010、エネルギー白書2015での算出方法に倣い、カントリーリスクの高い国の輸入シェアが実際より高くなるように輸出与信データによるカントリーリスクに+1を補正して調整しています)。

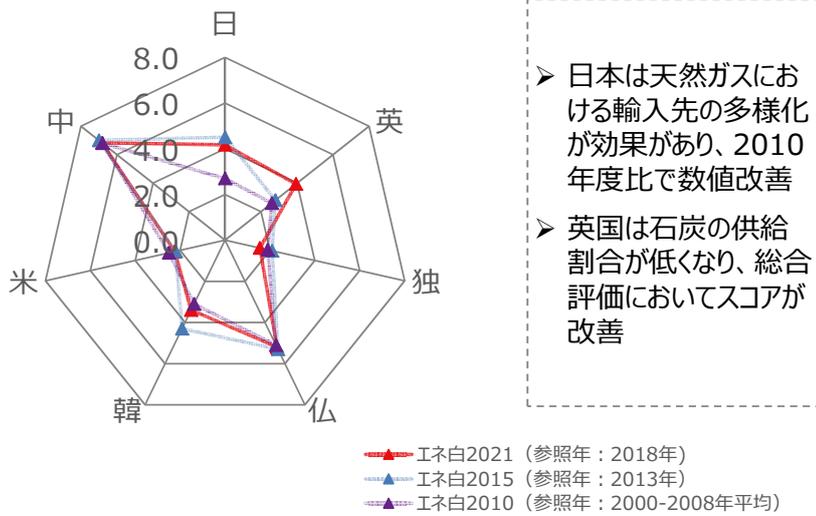
日本は2010年以降、豪州やロシアからの天然ガス輸入量を増やしており、輸入先の多様化が進んだことで、エネルギー白書2010での評価と比べて数値が大きく改善しています。また、英国は石炭への依存度が低減したことから、総合評価において点数が改善しています(第133-3-2)。

【第133-3-1】一次エネルギー自給率(点数)の変化



- ▶ 中国はエネルギー消費量の増加により自給率100%から悪化、輸入国へ移行した為スコア悪化
- ▶ 北海油田の生産減退から起こっていた、英国における自給率の悪化は下げ止まり

【第133-3-2】エネルギー輸入先多様化(点数)の変化



- ▶ 日本は天然ガスにおける輸入先の多様化が効果があり、2010年度比で数値改善
- ▶ 英国は石炭の供給割合が低くなり、総合評価においてスコアが改善

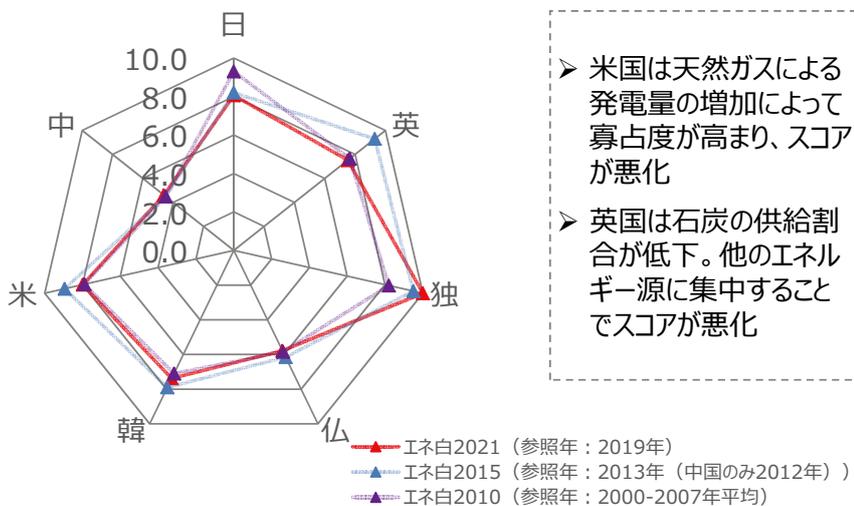
### (3) エネルギー源多様化

特定のエネルギーへの依存を減らすことは、エネルギー供給途絶時の悪影響を低減し、エネルギー安全保障の強化に寄与することになります。本項では、各国の「一次エネルギー供給量」及び「発電電力量」の2つのデータについて、エネルギー源ごとに各エネルギー源のシェア(%)の2乗を合計した値(ハーフィングール・ハーシュマン指数)をその国の特定エネルギー源への依存度として算出し、それを評価数値

として点数化しています。特定エネルギー源への依存度が低いほど良い評価となります。

エネルギー源の多様化において、日本は諸外国と遜色ない評価となっています。諸外国の動きとしては、米国は天然ガスによる発電量の増加によって寡占度が高まり、点数が悪化しているのが分かります。また、英国は石炭の供給割合が低下し、他のエネルギー源に集中することで点数が悪化しています(第133-3-3)。

【第133-3-3】エネルギー源多様化(点数)の変化



- ▶ 米国は天然ガスによる発電量の増加によって寡占度が高まり、スコアが悪化
- ▶ 英国は石炭の供給割合が低下。他のエネルギー源に集中することでスコアが悪化

#### (4) チョークポイントリスクの低減度

チョークポイントとは、物資輸送ルートとして広く使われている狭い海峡<sup>11</sup>を指しますが、原油やLNGなど大量のエネルギー輸送に際しても利用されることから、その安全確保、あるいはそこに依存しない輸送ルートの確保はエネルギー安全保障にとって非常に重要な要素となります。

本項では、各国が輸入する原油が、ホルムズ海峡、マラッカ海峡、バル・エル・マンデブ海峡(イエメンとアフリカ大陸の間にあり、紅海とアデン湾を隔てる海峡)、スエズ運河、トルコ海峡、デンマーク海、パナマ運河、喜望峰の8つのチョークポイントを通過することをリスクと捉え、評価を行いました。

原油総輸入量に対するチョークポイントを通過する各国の輸入原油の数量の割合をチョークポイント比率とし、これを評価数値として点数化しています。チョークポイントを複数回通過する場合は数量を都度計上するため、チョークポイント比率は100%を超えることもあります。

チョークポイント比率が低いほど、チョークポイントを通過せずに輸入できる原油が多いということになるため、良い評価となります。

日本は中東依存率が高く、多くのチョークポイン

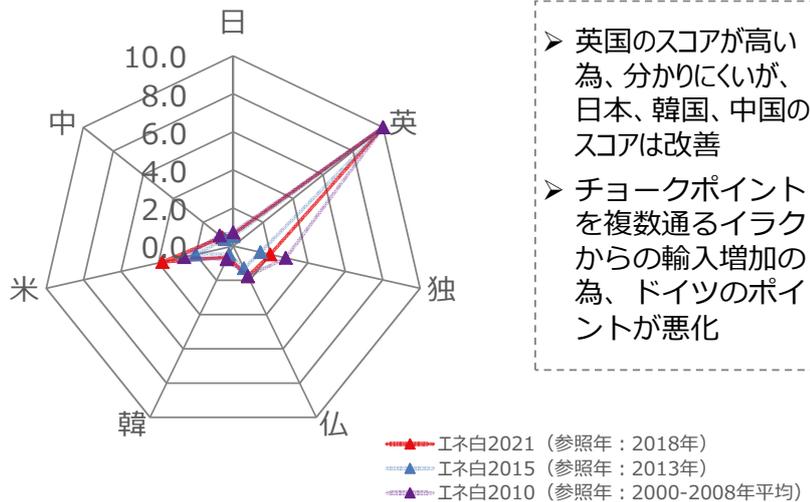
トを通るため、評価点が低い状況が続いています。特徴的なのは英国で、北海からの石油、天然ガス調達が可能でチョークポイントを一切通らないで済むため、スコアが突出しています。エネルギー白書2015から大きな変化を見せているのは米国で、中東からの輸入量減少に伴い、スコアが改善しています(第133-3-4)。

#### (5) 電力の安定供給能力(停電時間)

国内のエネルギー供給の安定度を測るには、電力や燃料、資源等の各エネルギーについて、国内における供給ネットワークが安定的に構築されているかを総合的に検証する必要がありますが、本項では、そのうち今後役割の向上が見込まれる電力を取り上げます。その供給信頼度を測る指標の一つとして、1世帯当たりの年間停電時間(停電が発生してから復旧するまでの時間)を評価数値として点数化します。評価数値が低いほど良い評価となります。

日本は、東日本大震災の影響を受けて、「エネルギー白書2010」での評価と比較して、「エネルギー白書2015」での評価は大きく低下していますが、近年では回復しています(第133-3-5)。

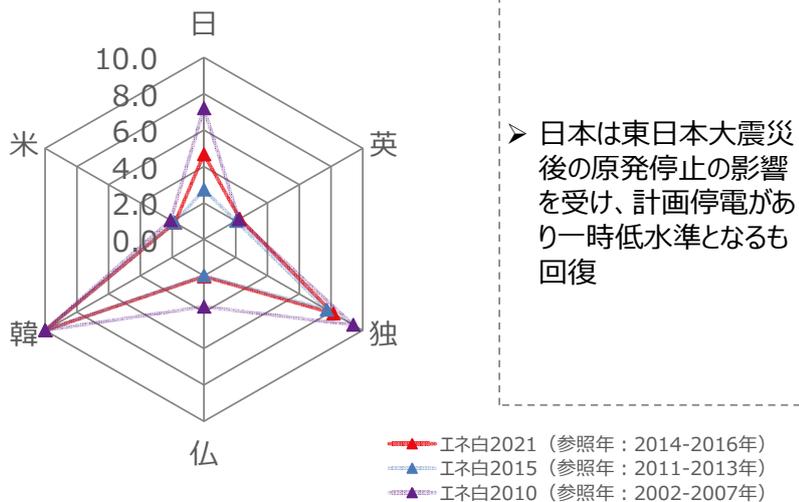
【第133-3-4】チョークポイントリスクの低減度(点数)の変化



- ▶ 英国のスコアが高い為、分かりにくいですが、日本、韓国、中国のスコアは改善
- ▶ チョークポイントを複数通るイラクからの輸入増加の為、ドイツのポイントが悪化

<sup>11</sup> チョークポイントについては、米国エネルギー省エネルギー情報局(EIA)が示したレポートにあるチョークポイント8カ所、すなわちホルムズ海峡、マラッカ海峡、バル・エブ・マンデブ海峡、スエズ運河、トルコ海峡、パナマ運河、デンマーク海峡、喜望峰を使用しています。

【第133-3-5】電力の安定供給能力(点数)の変化



➤ 日本は東日本大震災後の原発停止の影響を受け、計画停電があり一時低水準となるも回復

(6) エネルギー消費のGDP原単位

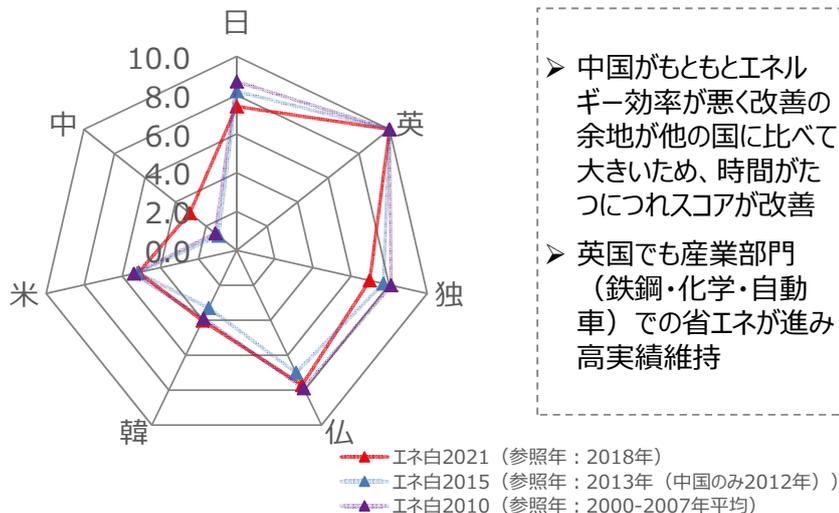
エネルギーの消費を抑制することも、必要なエネルギー供給量の削減につながるため、エネルギー安全保障を強化する上で効果的と言えます。ただし、エネルギー消費量を単純に減らすだけでは、経済活動や国民生活の水準を損なう可能性があります。機器等のエネルギー消費効率の改善や、産業界や国民の行動変容を通じたエネルギーの使い方の効率化などにより、エネルギー消費の抑制と、経済成長や国民生活の水準の維持・向上を両立していくことが不可欠です。

産業構造や気候等が異なる各国とのエネルギー効率の単純な比較は難しいですが、相対的な比較を示す1つの指標として、本項では、各国のGDPあたりの一次エネルギー消費量を評価数値として点数化し

ます。GDPあたりの一次エネルギー消費量が低いほど良い評価となります。

日本のエネルギー消費のGDP原単位は、英独仏に及ばないものの、米中韓よりも高い評価点を維持しています。英国では、主に産業部門(鉄鋼・化学・自動車)での省エネルギー化が進み高い点数を維持しているのが見て取れます。また、中国は、11次5ヵ年計画に基づき、2005年から省エネルギー技術や再生可能エネルギー技術開発に取り組み始めており、これまで諸外国と比較して低かったエネルギー効率が近年改善しています。他方、1980年台から省エネルギー化や再生可能エネルギー技術開発に取り組む欧米や日本に比較すれば、依然低いスコアであり、引き続き、エネルギー効率の向上の余地があると考えられます(第133-3-6)。

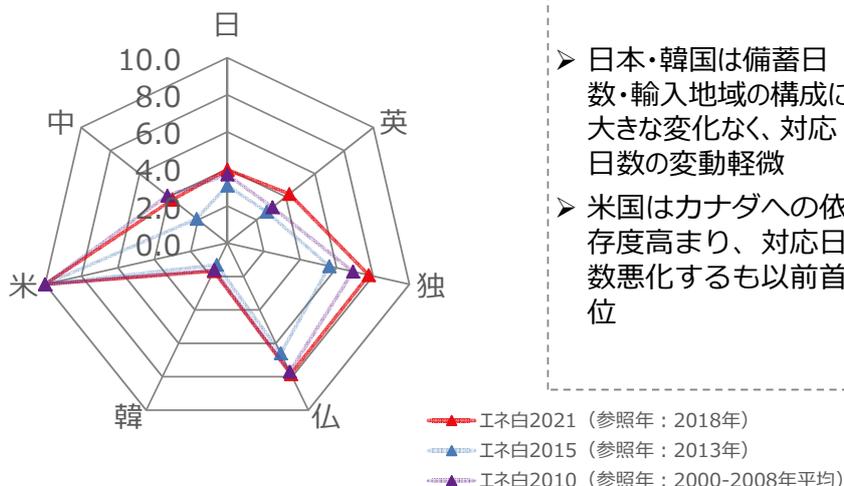
【第133-3-6】エネルギー消費のGDP原単位(点数)の変化



➤ 中国がもともとエネルギー効率が悪く改善の余地が他の国に比べて大きいため、時間がたつにつれスコアが改善

➤ 英国でも産業部門(鉄鋼・化学・自動車)での省エネが進み高実績維持

【第133-3-7】化石燃料の供給途絶対応能力(点数)の変化



- ▶ 日本・韓国は備蓄日数・輸入地域の構成に大きな変化なく、対応日数の変動軽微
- ▶ 米国はカナダへの依存度高まり、対応日数悪化するも以前首位

#### (7) 化石燃料の供給途絶対応能力(石油備蓄)

エネルギー資源の供給が一時的に途絶した場合を想定した備えは、エネルギー安全保障の強化において大きな対応能力になります。

本項では、国際比較が可能な石油の陸上備蓄量をベースとして、仮に各国の最多輸入先(地域)からの原油供給が途絶した場合、その備蓄によって対応可能な日数を評価数値として点数化します。対応可能な日数が多いほど良い評価となります。

日本・韓国は備蓄日数・輸入地域の構成に大きな変化なく、対応日数の変動は軽微となっています。米国は、カナダへの依存度高まったことから、対応日数が悪化していますが、依然首位を維持しています(第133-3-7)。

## 4. エネルギーセキュリティの変化を踏まえた定量評価

第2節で概観したとおり、2050年カーボンニュートラルに向けた気候変動対策の強化や太陽光や風力発電等の自然変動電源の大量導入など、エネルギーを巡る情勢はこれまで以上に大きく変わろうとしています。IEAの「World Energy Outlook」のエグゼク

ティブ・サマリーからも読み取れるように、エネルギーセキュリティの観点から重視すべき項目は、時代を経て拡大してきています。「エネルギー白書2010」で示した従来型のエネルギーシステムの基策定された7つの指標だけでは、我が国のエネルギーセキュリティを十分に評価することは難しくなっていると考えられます。

そこで、本項では、上記の①～③、それぞれの観点から新たに導入すべき指標を検討します。第133-4-1の左側に示されているのが、従来7つの指標であり、右側が①～③に相当する追加指標の案となります。指標としての妥当性、取得可能なデータ信頼度等を基に検討した結果、今回は、①は蓄電能力、②はサイバーセキュリティ対応度を定量評価することとしました<sup>12</sup>。なお、③の指標案としては、例えば、水素やアンモニアにおけるサプライチェーン強靱性が考えられますが、水素やアンモニアが現段階で大量に輸送される状況になく、データ取得できないことから、今回は定量評価を行いませんでしたが、今後、エネルギー源としての水素やアンモニアの普及が進み、データの取得等が可能になった段階で評価を行うことが有用であると考えられます<sup>13</sup>(第133-4-1)。

<sup>12</sup> 今回の追加指標は、OECDが指摘したSSDIの限界(太陽光や風力発電等の再生可能エネルギー源が含まれていない。(今後のエネルギーセキュリティの評価には)自然変動電源が電力システムに与える影響を考慮する必要がある)とも整合しています。

<sup>13</sup> 2021年3月31日、国際エネルギー機関(IEA)及び英国が共催する「IEA-COP26ネットゼロサミット」がテレビ会議形式で開催され、日本からは、梶山経済産業大臣が参加し、「全体セッション」の冒頭で、「クリーンエネルギー・トランジションにおけるエネルギー安全保障の役割」についてスピーチ。カーボンニュートラルは、途上国も含め国際社会全体で取り組むべき課題であり、各国の状況に応じて「全てのエネルギー、全ての技術」を活用した現実的かつ多様なアプローチが重要であること、エネルギーの安定供給は社会の基盤であり、移行のプロセスにおいて、変動電源の導入拡大、自然災害、サイバー攻撃等のエネルギー安全保障上の新たな脅威に対し、ハード・ソフト両面での「強靱性」の担保や投資の確保、アンモニアや水素の活用も含めた多様な電源の活用が重要であることを強調しました。

【第133-4-1】エネルギーセキュリティの変化を踏まえた定量評価

| 従来の指標         |                 | 追加指標案                   | 内容/考慮すべき事項  |
|---------------|-----------------|-------------------------|---|
| 従来の指標         | 一次エネルギー自給率      | ①気候変動対策とレジリエンス          | 蓄電能力（蓄電容量/蓄電池及び素材の輸入分散度）  |
|               | エネルギー輸入先多様化     |                         | 分散型電源比率   |
|               | エネルギー源多様度       |                         | エネルギー・レジリエンス指標  |
|               | チョークポイントリスクの低減度 | ②再エネ大量導入とデジタル化          | サイバーセキュリティ対応度   |
|               | 電力の安定供給能力       |                         | 電力の需要抑制能力   |
|               | エネルギー消費のGDP原単位  |                         | 脱炭素電源の導入ポテンシャル  |
| 化石燃料の供給途絶対応能力 | ③脱炭素燃料への転換      | 水素/アンモニアにおけるサプライチェーン強靱度 |   |
|               |                 |                         | 蓄電池や揚水発電等の蓄電容量、リチウムイオン蓄電池などの製品・原材料の輸入多様化<br>総電力需要に対するコジェネ等の分散型電源の導入容量の割合 ※各国比較が困難<br>主に需要側のレジリエンスを測定する指標を開発中。国単位での評価は現在想定されていない<br>ITUが規定する基準への適合度合いを評価<br>総電力需要に対するDR/VPPIによる制御電力量の割合（デジタル制御の有効性を評価）※各国比較が困難<br>再エネ等の脱炭素電源を一定のコスト以下でどれだけ導入可能かを評価 ※同一条件で各国比較が困難<br>水素やアンモニアの輸入先多様性や総エネルギー需要に占める割合 ※足元では需給がごくわずか |

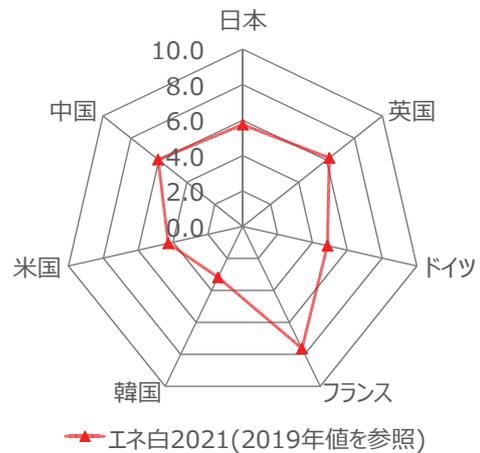
5. 追加指標における評価と分析

(1)蓄電能力

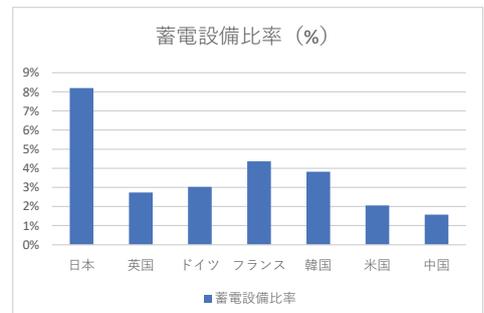
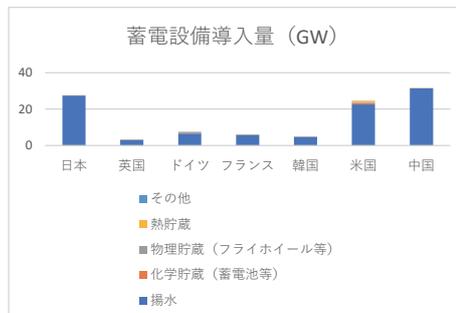
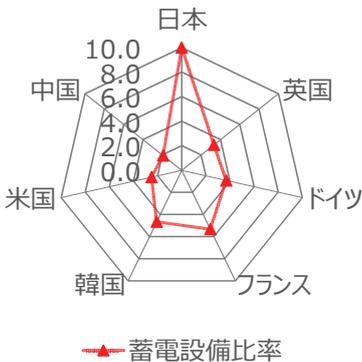
電力システムの柔軟性を図る指標として、蓄電能力を新たに導入しました。国内の発電容量に対する蓄電容量の比率と、今後重要性が急速に高まる蓄電池及び蓄電池素材の輸入分散度の指標を組み合わせ「蓄電能力」の指標としています(第133-5-1)。

日本は、蓄電容量について揚水発電設備の保有量が、中国に次いで世界2位となっており、その結果、発電設備容量に対する揚水発電設備の比率で規定した「蓄電能力」の指標は、日本が突出する結果となっています(第133-5-2)。

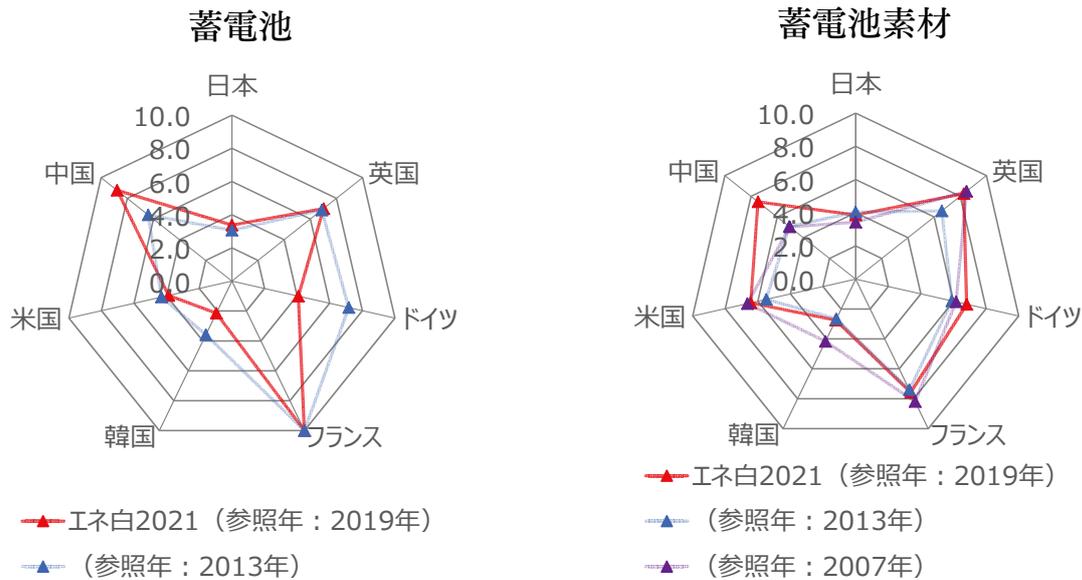
【第133-5-1】蓄電能力



【第133-5-2】蓄電容量



【第133-5-3】蓄電能力(蓄電容量/蓄電池及び素材の輸入分散度)



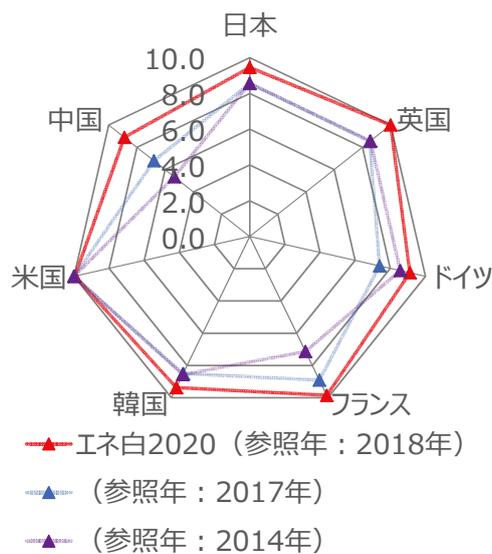
日本では、現在、蓄電容量の大部分を揚水発電設備が占めていますが、今後、揚水発電容量を大きく拡大していくことは困難です。再生可能エネルギーの大量導入に伴い蓄電能力の拡大が必要になりますが、これを可能とする蓄電池及び蓄電池素材の安定調達が今後は重要な指標になるものと考えられます。

フランスは、蓄電池の主要輸入先が中国以外(ポーランド)にも存在し、蓄電池の輸入分散度の指標において、高い点数を有しています(第133-5-3)。

(2)電力のサイバーセキュリティ

デジタル化の進展に伴い、主要インフラであるエネルギーにおけるサイバーセキュリティの重要性は増加していくことから、新たにサイバーセキュリティ指標を設けます。国際電気通信連合 (ITU) が設定している、5つの指標<sup>14</sup>を基に各国のサイバーセキュリティを評価しており、指標化しています。調査対象国は、いずれも高い点数を示しています(第133-5-4)。ITUが設定した5指標は、国家間での比較を容易にするため、国家レベルでの制度や組織の

【第133-5-4】電力のサイバーセキュリティ



14 ①Legal (サイバー犯罪やサイバーセキュリティ等に関する法制的整備状況)、②Technical Measures (サイバーセキュリティ情報の共有、技術的支援組織の整備、基準の策定等)、③Organizational Measures (国家レベルのサイバーセキュリティ戦略の整備や責任官庁の設置等)、④Capacity Building Measures (サイバーセキュリティ専門人材の育成、資格の整備等)、⑤Cooperation Measures (国際的なサイバーセキュリティ協力の実施等)

整備状況に着目し評価を行っており、各国の政府や民間企業等における実際のサイバーセキュリティに係る取組状況(データの保管方法やサイバー攻撃への対策状況等)については評価の対象になっていません。今後、こうした実際のサイバーセキュリティに係る取組状況なども指標として評価ができるよう検討を行う必要があります。

「エネルギー安全保障の定量評価指標」の7指標については外的要素についての評価が多かったですが、今回追加で指標化した「蓄電能力」と「電力のサイバーセキュリティ」についてはどちらも国内における電力システムに関連する「内的な要素」となっており、日本においても外的要素だけでなく、内的な要素についても検討する必要があります、エネルギーセキュリティを評価する際にも意識しなければならぬことが増えています(第133-5-5)。

**(3)エネルギーセキュリティの変化を踏まえた定量評価結果(9指標による評価)**

今回追加した指標は、脱炭素における主力技術である再生可能エネルギーに重きを置いたものとなっています。「エネルギー白書2010」から使用してい

【第133-5-5】エネルギーセキュリティの変化を踏まえた定量評価(最新実績)

