



SMRを巡る国際動向とそのインパクト

2018年9月20日

田中 隆則

(公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター (RWMC)

元 LAE 一般財団法人 エネルギー総合工学研究所

革新炉技術の開発

- 2011年に発生した福島第一原子力発電所事故は、原子力災害の影響の甚大さを認識させるものとなり、各国の原子力政策に大きな影響を与えた。また、電力市場を始めとするエネルギー市場の自由化の進展に伴い、投資回収に長期を要する原子力事業は、リスクの高いものと見なされ、新設が難しくなっている。

これまでに、シェールガスの生産技術の革新により、国際石油情勢は大きく変貌し、再生可能エネルギー技術の進歩は、その供給シェアを大きく伸ばしている。また、IT技術は、スマートグリッド/デジタルグリッドの成立を可能としている。

一方、地球温暖化問題は、国際的に喫緊の課題となっており、これまで以上に効果的な対策を大規模に進めることが求められている。変貌するエネルギー情勢の中で、このようなニーズに対応するため、原子力をはじめとする**エネルギー技術のイノベーションへの期待**も高まっている。

- このような中で、原子力においては、これまで、第四世代原子力システムに関する国際フォーラム（GIF）等の枠組みにおいて、高度な安全性、持続可能性、良好な経済性等を開発目標とした**革新的原子炉の研究開発**が進められている。GIFで取り上げられている炉型のうち、高温ガス炉、高速炉を中心にその研究開発が、米、英、仏、露、中、印といった国々で進められている。
- また、**小型モジュール炉（SMR）**は、安全性の向上、自由化市場への対応、原子力産業の活性化など様々な視点から、米国、英国、カナダを中心として開発へ向けての取組みが見られる。

さらには、アジア、中東等の諸国でもSMRなど革新的原子炉を含む原子力の研究開発・導入への関心が高まっている。

SMRと革新炉技術

小型化及びモジュール化

SMR (炉型は様々)

対応する炉型

第4世代

超臨界圧水冷却炉

Na冷却高速炉
重金属冷却高速炉

高温ガス炉
ガス冷却高速炉

熔融塩炉

第3世代+

将来型軽水炉

第4世代以降の技術

加速器駆動システム

核融合

第5次エネルギー基本計画（抜粋）

「第2章 2030年に向けた基本的な方針と政策対応」

「第3節 技術開発の推進」

「2. 取り組むべき技術課題」

・・・準国産エネルギーに位置付けられる原子力については、軽水炉技術の向上を始めとして、国内外の原子力利用を取り巻く環境変化に対応し、その技術課題の解決のために積極的に取り組む必要がある。その際、安全性・信頼性・効率性の一層の向上に加えて、再生可能エネルギーとの共存、水素製造や熱利用といった多様な社会的要請の高まりも見据えた原子力関連技術のイノベーションを促進するという観点が必要である。まず、万が一の事故のリスクを下げていくため、過酷事故対策を含めた軽水炉の一層の安全性・信頼性・効率性向上に資する技術の開発を進める。また、水素製造を含めた多様な産業利用が見込まれ、固有の安全性を有する高温ガス炉など、安全性の高度化に貢献する技術開発を、海外市場の動向を見据えつつ国際協力の下で推進する。さらに、原子力利用の安全性・信頼性・効率性を抜本的に高める新技術等の開発を進める。このような取組を支えるため、人材育成や研究開発等に必要な試験研究炉の整備を含め、産学官の垣根を越えた人材・技術・産業基盤の強化を進める。なお、こうした取組を進めるに当たっては、**小型モジュール炉や熔融塩炉を含む革新的な原子炉開発を進める米国や欧州の取組も踏まえつつ、国は長期的な開発ビジョンを掲げ、民間は創意工夫や知恵を活かしながら、多様な技術間競争と国内外の市場による選択を行うなど、戦略的柔軟性を確保して進める。**・・・

SMRへの期待と課題

■ SMRの特性と期待

- **安全性・レジリエンス性**：内蔵放射能が小さく、フルパッシブなど革新的な安全システムの採用により、合理的な機器・設備の簡素化や防災計画エリアの縮小などが可能
- **革新的な製造方式**：原子炉の殆どを工場で効率的に組み上げる生産方式となり、品質の維持・向上を達成しやすい
- **投資リスクの低減**：1基の炉価格が低く建設期間が短いため、初期投資が抑えられ早期の投資回収が可能。段階的な容量増加など柔軟な選択が可能となり、投資リスクが小さい
- **運転・保守管理の容易性**：パッシブ化により事故時の対応が軽減されるとともに、簡素化設計によりメンテナンスが容易となる。
- **小規模グリッドへの適用性**：電力需要が小さい地域や電力グリッドの未発達な地域（途上国等）への普及が可能となる
- **負荷追従や熱供給**：再生可能エネルギーの出力変動を調整するカーボンフリー電源としての活用可能性あり。また、周辺産業や地域への熱供給源としての利用も可能

■ SMRの課題

- **経済性**：従来のスケールメリットによるコスト削減の方向に反するアプローチであり、経済性が低下
- **安全規制**：現行の炉型と異なるため、許認可に係る負担が大きく、実現の見通しが不透明
- **新たなサプライチェーンの構築**：これまでの大型軽水炉と異なる新たなサプライチェーンの構築が求められる

SMR等を巡る各国の取組み（1）

■ 米国（政府関連）

- 米国においては、原子力技術、原子力産業におけるリーダーとしての位置づけを維持することが、安全保障の観点からも不可欠との視点があり、SMRも含めた原子力技術開発への積極的な取組みが見られる。（日本と異なり軍用原子炉の維持・開発ニーズがあることに留意）
- 米国議会下院は、2017年1月、**新型原子炉技術の研究開発促進法案**を可決、上院で審議中。法案では、原子力発電における米国のリーダーシップ維持の観点から、新型原子炉許認可を効率化するため、**エネルギー省（DOE）**と**原子力規制委員会（NRC）**が連携して取り組むことを求めている。
- **DOE**においては、SMRの早期導入支援や革新炉概念の開発（2030年代初期の実証を目標）等を進めており、特に許認可プロセスの確立に向け産業界・NRCと連携した取組み*を行っている。また、2017年1月には、SMRも含めた革新炉について、**開発・導入のビジョンと戦略**を取りまとめ、公表している。（なお、次世代革新炉（NGNP：ガス炉）の開発は、民間との共同開発のフェーズに移行できず中断） *：産業界が主導しDOEが資金支援をするLMP（Licensing Modernization Project）やNRCとの連携事業
 - **LTS**（Licensing Technical Support program）：新しい原子力技術に関する許認可対応を支援する制度。SMRは、革新的な炉型であり許認可リスクが大きいことから、支援対象としており、**NuScale**の軽水型SMRが支援を受け、NRCの設計認証の審査を受けているところ。
 - **GAIN**（Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear）：産業界や大学・研究機関に対する革新技術の研究を支援。DOEの国立研究所を活用。
- **NRC**は、出力30万kW以下の軽水炉をSMRと定義しており、非軽水炉型の炉は、出力に関係なくnon-LWR型の革新炉とのくくりで取り扱っている。
 - SMRの審査上の課題（ソースタームの計算方法、緊急時計画の要件、など）について、10数件に亘り検討。その多くは、SMRとnon-LWRに共通のもの。
 - NuScale（アイダホ国立研究所内に建設予定）の設計認証を受理し、2020年9月に審査を終了するとのスケジュールを公表。その他、軽水炉型2件（BWXT mPower、SMR-160）、小型高速炉、熔融塩炉、高温ガス炉等6件についてPre-Application評価中。更に非軽水炉型のPre-Applicationの申請が見込まれている。
 - TVAがClinch River Nuclear（CRN）siteに複数のSMRを設置するとのEarly Site Permitを申請

SMR等を巡る各国の取組み（2）

■ 米国（産業界等）

- SMR設計の商業化を進めている**米国企業14社が連合**して「**SMR START**」を創設し、米国で開発されるSMRの国内建設と将来的な輸出を加速するには、官民の連携が不可欠であると連邦政府に訴える声明文を発表。
- 先進的製造技術に取り組む**先進的原子力製造センター（CANM）**が発足するなど、原子力機器の製造技術復活に向けての積極的な取組みが行われている。（**NuScaleのSG開発**も実施予定）
- 原子カイノベーション連合（NIA）は、原子力分野の技術革新と革新炉の商業化を提唱する技術者、学者、企業・投資家、環境保護団体など連合組織であるが、2017年10月11日、政府に対してSMRの開発・商業活動に対して支援を呼びかける報告書を取りまとめた。この報告書では、コスト面も含めたSMRの優位性や、再生可能エネルギーと組み合わせた電力システムの構築可能性、などをアピールするとともに、許認可や税制面など、技術開発後の競争条件整備を求める提言が盛り込まれている。
- NuScaleなどの軽水炉型のSMRに加え、「ARC」（aSMR、GEH（PRISM）と連携）、「TerraPower」（TWR：進行波炉）、「Transatomic Power」（熔融塩炉）などの non-LWR、更には「Tri Alpha Energy」（核融合）など、**ベンチャー企業**による革新技術開発への取組み事例あり。
- なお、米国航空宇宙局（NASA）においては、出力10 kWe10年の連続運転が可能な超小型原子炉（Kilopower）を太陽エネルギーが乏しい宇宙空間でのエネルギー源とするため、DOEの協力を得て開発を進めており、2018年5月、宇宙での利用が可能であることを実証したと発表している。

SMR等を巡る各国の取組み（3）

■ 英国

- **英国産業界（ロールスロイスなど）**は、積極的にSMRの開発を進め、国内の**サプライチェーンと雇用の創出**を図るべく、政府に働きかけている。なお、国際市場を目指す上で、海外企業との連携が必要との認識。
- 英国の官民連携シンクタンク、エネルギー技術研究所（ETI）は、2016年9月、2030年までにSMRを開発するための政策的な取組等に関する報告書を公表。熱電供給システムとしての利用を推奨。
- **国立原子力研究所（NNL）**は、2014年、政府からの委託を受け、SMRの市場性や技術に関するFSを実施し報告書を取りまとめた。その中で、有望な技術として**4種類のSMR（ACP100、NuScale、mPower、Westinghouse SMR）**を選定している。
- **議会上院・科学技術委員会**は、報告書「Nuclear research and technology: Breaking the cycle of indecision」を2017年5月に公表。原子力産業の振興に向けて政府が必要な決断を行う必要性を指摘した。研究開発支援の拡大、GEN-IVへの参加、NNLへの資金供与などを求めた。また、SMRコンペの工程が守られていない点に政府の戦略決定ができない問題が表れているとも指摘している。
- **ビジネス・エネルギー・産業戦略省（Department for Business, Energy & Industrial Strategy）**は、原子力の革新的技術開発において英国がリーダーシップをとるための施策の一環として、SMRの開発と商業化および資金調達に対する市場の関心を正確に把握するため、**SMRコンペ（フェーズ1）**を2016年3月に開始（議会下院から開発支援を行う前に市場性を確認すべきとの指摘あり）、2017年12月に予定より1年以上遅れて終了。関心表明を行い適格とされた33件のプロジェクトと組織の名称が公表されたが、フェーズ1の次のステップが特段計画されていないことも明らかとなった。なお、2017年12月に、原子力イノベーションのための予算措置の第2フェーズとして第IV世代炉を含めた革新炉の開発支援と規制対応のための予算措置が取られた旨発表された。今後、有望なベンダーに対して開発促進のための資金支援を実施する方針。
- 2017年7月、**原子力先端製造研究センター（Nuclear AMRC）**を開設、製造技術の開発に取り組んでいる。

SMR等を巡る各国の取組み（4）

■ カナダ

- CNL（Canadian Nuclear Laboratories）がSMRに関する研究開発支援を行うとともに、CNSC（Canadian Nuclear Safety Commission）には、多くのSMRのベンダーから設計に対する事前審査サービスへの申し込みが行われるなど、カナダにおいてはSMR実現に向けた活発な動きがみられる。
- **CNL**は、SMR技術を優先研究課題に位置付け、2017年4月に改訂された10年計画において、**2026年までに商業炉としての成立性を示す**ことを目標に掲げた。2017年6月、ベンダーや研究者やユーザー等に対してSMRに対する関心表明を求めた。同年8月に応募は締め切られたが、80件の関心表明があり、そこにはCNLサイトへの設置を含め炉型は21に上っている。10月にサマリーレポートが取り纏められ公表された。CNLのSMR研究プロジェクト（施設整備等）には、AECL（Atomic Energy Canada Limited）からの政府資金 CA\$1.2 billion（US\$940 million）が投じられる。2018年4月、ACECLのサイトに建設するSMRの提案募集が行われ、6月までに4プロジェクトの提案があり、評価が行われている模様。
- **CNSC**は、SMRの規制上の課題を整理（DIS-16-04）、現在、許認可のためのガイドを策定中。なお、正式な許認可手続きとは異なるサービスとしてベンダーに対する原子炉設計の事前審査（**Pre-Licensing Vendor Design Review**）を行っている。フェーズ1において、設計が規制基準全般に亘り適合しているかを評価（12～18ヶ月）、フェーズ2において、許認可上障害となる可能性のある点を同定する詳細な評価（約24ヶ月）が行われる。現在、**10件が、評価中または評価に向けての調整等の状況にある**。そのうち8件が、非軽水炉型SMRである。
- **天然資源省**は、2018年2月、CNSCなど関係者とともにSMRに関する**戦略ロードマップ**の作成を開始。ワークショップ等の開催を経て、秋に取りまとめの予定。
- **議会（天然資源委員会）**は、2017年6月、岐路にある原子力セクターとの表題のレポートを纏め、SMRについても記載。SMR開発への政府の支援を勧告した。
- **オンタリオ州政府**（Ontario Ministry of Energy）は、北部遠隔地の鉱山地域に設置可能なSMRについて、HATCH社にFS調査を依頼した。2016年6月、報告書が取りまとめられたが、まず、ショートリストにおいて9つのSMR技術に絞り込まれた後、4つ（SFR、LFR、GCR（2タイプ））が利用に適したものとして取り上げられている

SMR等を巡る各国の取組み（5）

■ 欧州をはじめとするその他の国

- **欧州**においては、EU/EURATOMのフレームワーク「持続可能な原子力技術プラットフォーム」**SNETP**の下で、産業界が新たな原子炉の開発に取り組んでいる。
 - **SNETP**の下のタスクフォース：**NUGENIA（軽水炉技術）、ESNII（高速炉）、NC2I（ガス炉）**
- **フランス**は、我が国と同様、核燃料のリサイクル利用の方針の下、原子力・代替エネルギー委員会（CEA、元原子力庁）がナトリウム冷却高速炉を中心とした開発を進めているが、2018年6月、WNE2018において、**EDF**がSMRの開発を進めている旨表明した。
- **ロシア**は、国営原子力企業（ROSATOM）が政府組織の機能も有した体制の下、フランスと同様、精力的に高速増殖炉や高温ガス炉などの開発を進めている。SMRについては、浮揚式原子力発電所（軽水炉KLT-40S）を建設している。
- **中国**においては、国家能源局（NEA）の指導の下、様々な機関が高速炉、高温ガス炉、超臨界圧水冷却炉、SMR（ACP100S、ACPR50Sなどの浮揚式を含む）など幅広い炉型に亘る開発に取り組んでいる。特に、精華大が中心となりペブルベッド**HTGR型SMR**の開発に力を入れている。
- **韓国**は、未来創造科学部（MSIP）主導でシステム一体型・先進モジュール炉（**SMART**）を輸出プラントとすべく、開発を進めている。（ヨルダン、サウジ等で建設の見込み）
- **アルゼンチン**は、研究炉の開発・建設経験を活かし、発電または海水淡水化等に用いるPWR型SMR（CAREM-25）を建設中である。
- これらの国に加え、**ウクライナ**は、ホルテック社のSMR-160を国内建設と国産化を計画。**インドネシア**は、インドやロシア、中国と高温ガス炉等の共同開発を計画。**サウジアラビア**は、アルゼンチン（CAREM）や韓国（SMART）、中国（高温ガス炉）からSMRの導入を計画。

SMR等を巡る国際機関の取組み（1）

■ 国際原子力機関（IAEA）

◆ Regulatory Cooperation Forum（RCF）

- RCFは、IAEAの安全基準に基づく協力を基礎として、各国の規制機関（幹部）が規制に関する知識や経験の共有を図るフォーラム
- 2017年9月22日、IAEA 61st General Conferenceの Side Events として、第8回RCF会合が開催され、SMRに特化した許認可プロセスに関して議論、その後も、ワークショップなどを開催し、2018年1月、規制上の課題を取り上げた報告書を作成。

◆ Coordinated Research Project（CRP）

- Design and Performance Assessment of Passive Engineering Safety Features in Advanced Small Modular Reactors（2017年7月開始。3年計画。SMRのうち、特に現在開発中のPWR型のものを中心に検討）
- Development of Approaches for Determining Technical Basis for Emergency Planning Zone（EPZ） for SMR（2018年から開始）

◆ 革新的原子炉開発プロジェクト（INPRO）

- INPROは、原子炉と燃料サイクルにおける、望ましい革新を達成するための活動を国際的に共同で検討するプロジェクト。41か国とEUが参加。工場生産型のSMRの普及に関するケーススタディを実施。

◆ 会議、報告書等

- 軽水炉（軽水/重水）の技術に関する検討を行う常設ワーキンググループ（TWG-LWR）を中心に、革新炉やSMRに関する検討を行っている。また、SMRに関するワークショップ、技術会合、コンサルタント会合などを2012年から数多く開催。
- 2014年9月、報告書「[Advances in Small Modular Reactor Technology Developments](#)」を公表。現在も、SMRの技術ロードマップや環境影響評価に関する報告書や安全に関するTECDOCなどを取りまとめているところである。

SMR等を巡る国際機関の取組み（2）

■ 経済協力開発機構/原子力機関（OECD/NEA）

- 2050年を目指して国際共同で取り組む革新技术に関して検討するNI2050プログラムを策定中。
- 2016年12月、報告書「**Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment**」を公表
 - SMR普及のための条件を提示（大量生産、サプライチェーンの整備、低ファイナンスコスト、許認可体制の整備、など）

■ 第4世代原子力システムに関する国際フォーラム（GIF）

- 国際協力の下、革新的な原子力システムの研究開発を進めることを目的に発足した国際組織であり、13か国とEURATOMが参加し、OECD/NEAが事務局を務めている。
- 対象となる原子力システムは、ナトリウム冷却高速炉(SFR)、ガス冷却高速炉(GFR)、鉛冷却高速炉(LFR)、超高温ガス冷却炉(VHTR)、超臨界圧水冷却炉(SCWR)、熔融塩炉(MSR)の6炉型となっている。

■ 多国間設計評価プログラム（MDEP）

- 国際標準炉の審査中、あるいは審査経験を持つ各国の規制機関が、情報交換を目的に設置した国際組織
- 2017年9月、規制機関以外のステークホルダーも参加する第4回MDEP Conference において、SMRを対象とした検討の必要性を指摘する意見が出されており、今後、規制の共通化に向けた検討が行われる可能性あり。

SMRの経済性

■ 発電コスト

スケールメリットを追求し、発電コストの低減を図ってきた大型炉に比べ、発電コストは上昇すると考えられるが、以下のような対策によって、大型炉並みに抑えようとしている。

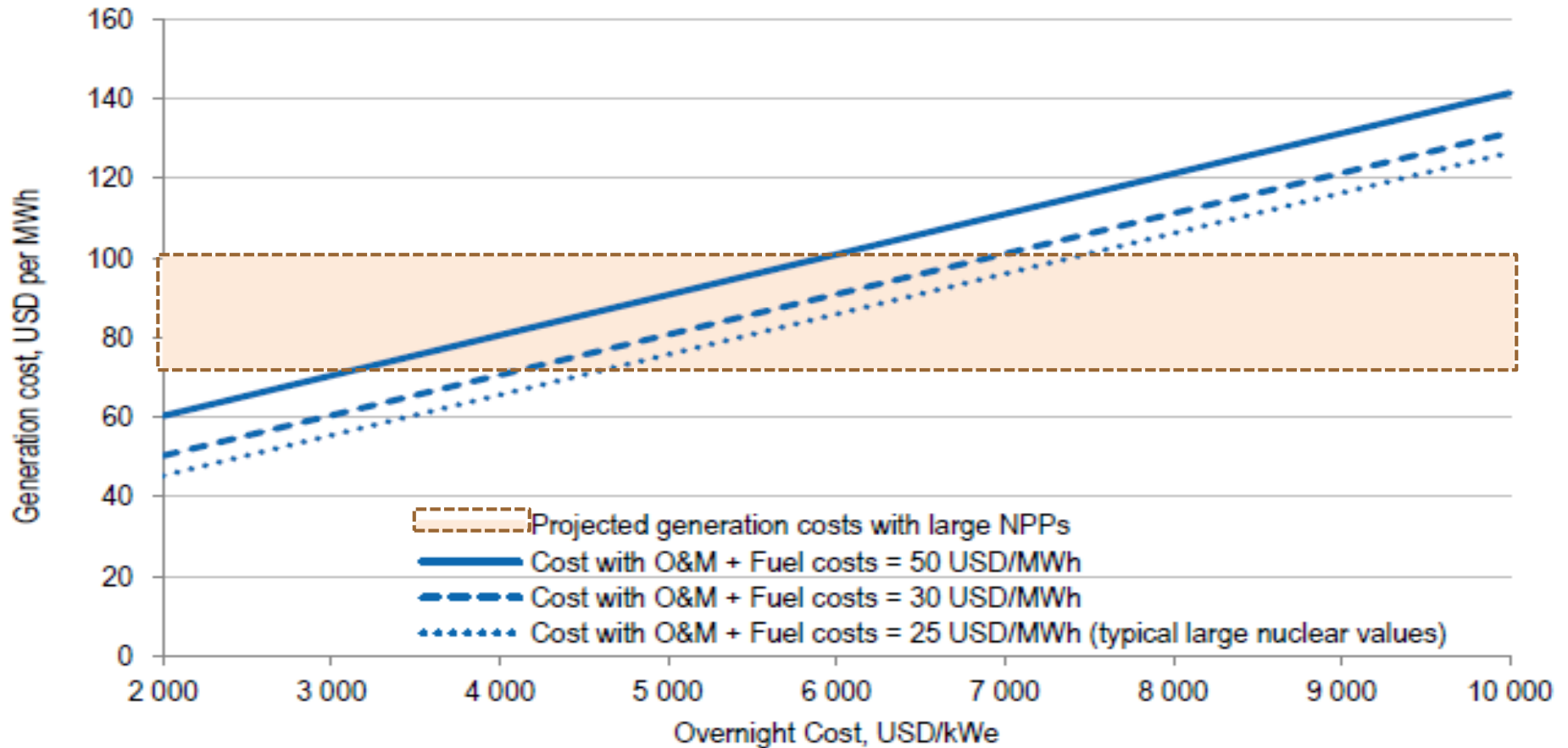
- **設計の簡素化**：パッシブ系の採用により、安全設備等を大幅に簡素化
- **工場生産方式**：工場内において、原子炉全体を複数、同一設計で製造。品質管理も徹底が図りやすく効率的な生産によって、コストを低減
- **建設期間の大幅な短縮**：工場において原子炉を始めとしてプラント機器の大部分を製造することによりサイトにおける建設工程を大幅に減らし、建設期間を大幅に短縮
- **メンテナンス作業の削減**：安全設備等機器の削減により、メンテナンス作業も削減
- **運転管理の合理化**：パッシブ化、設備削減により運転員の負担が軽減されることにより、一つの制御室でマルチユニットの制御が可能（規制制度に依存）

■ 投資リスク

- **1ユニット当たりの投資額の縮小**：複数ユニットを設置する場合も、小規模な投資を段階的に積んでいくことができ、投資リスクを減らすことができる。
- **投資回収期間の短縮**：再建設期間が短縮されるため、投資してから、電力供給による収入を得るまでの期間が短縮される。
- **サプライチェーンの簡素化**：大型炉と異なり、機器供給体制を簡素化することにより、下請け構造が簡素化され、製造・建設における遅延等のリスクが低減される。

SMRの発電コスト

Figure 2.2: Electricity generation cost with SMRs as a function of capital costs, at a 5% real discount rate



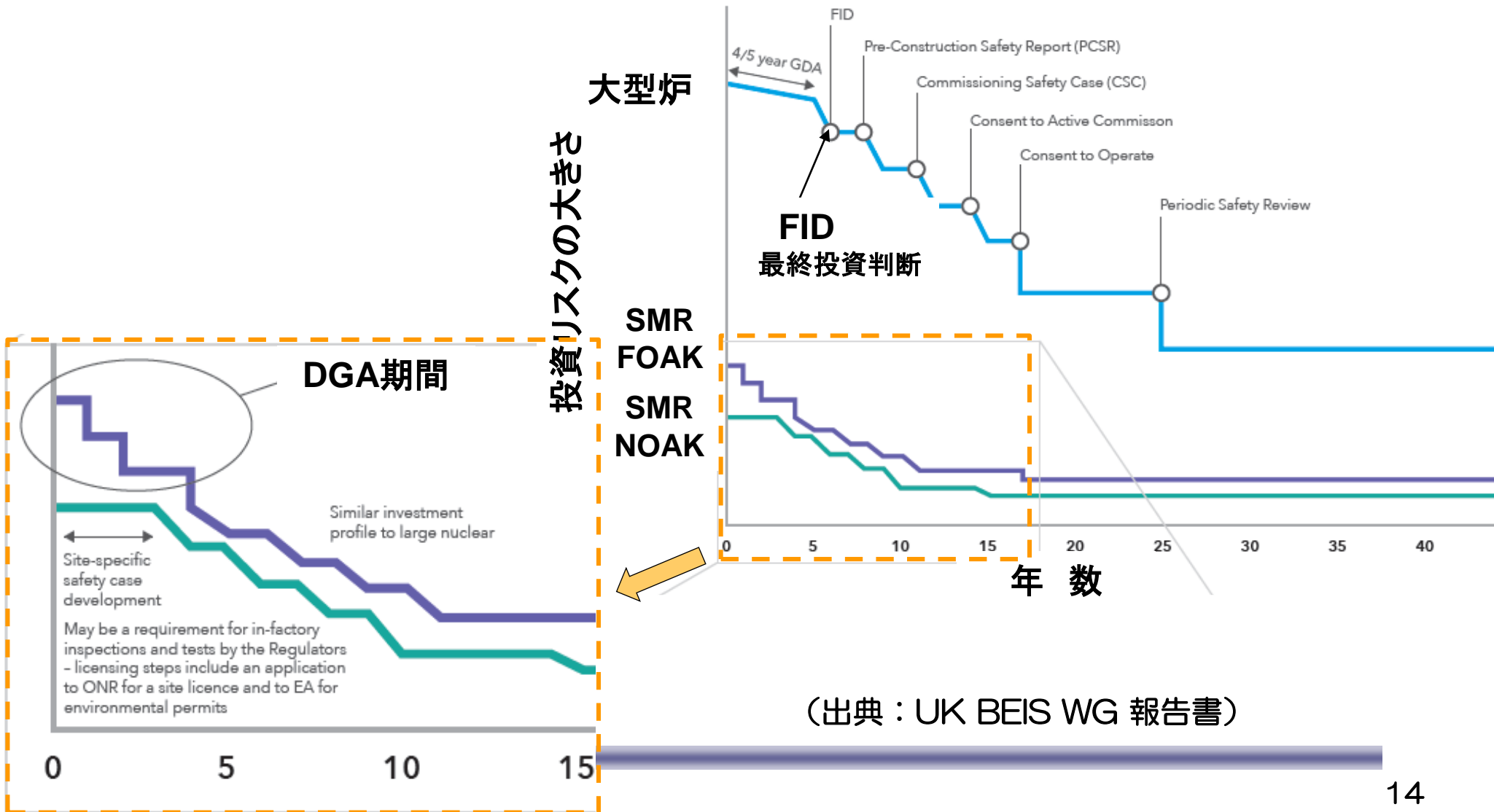
Source: Based on information from NEA/IEA, 2015.

Note: Assumed capacity factor is 95%.

(出典：OECD/NEA報告書)

SMRと投資リスク

Investment Risk Profiles for Large and Small Nuclear Project



SMRに対する安全規制（1）

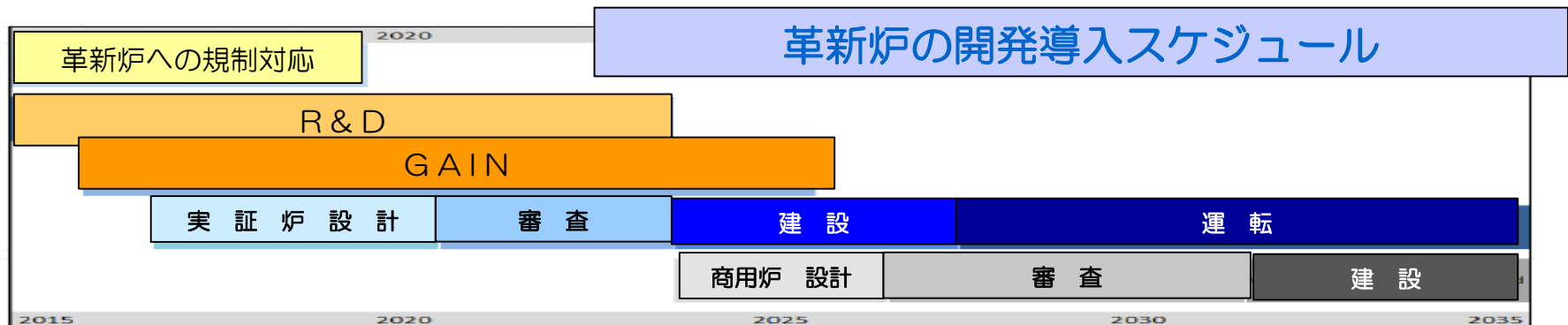
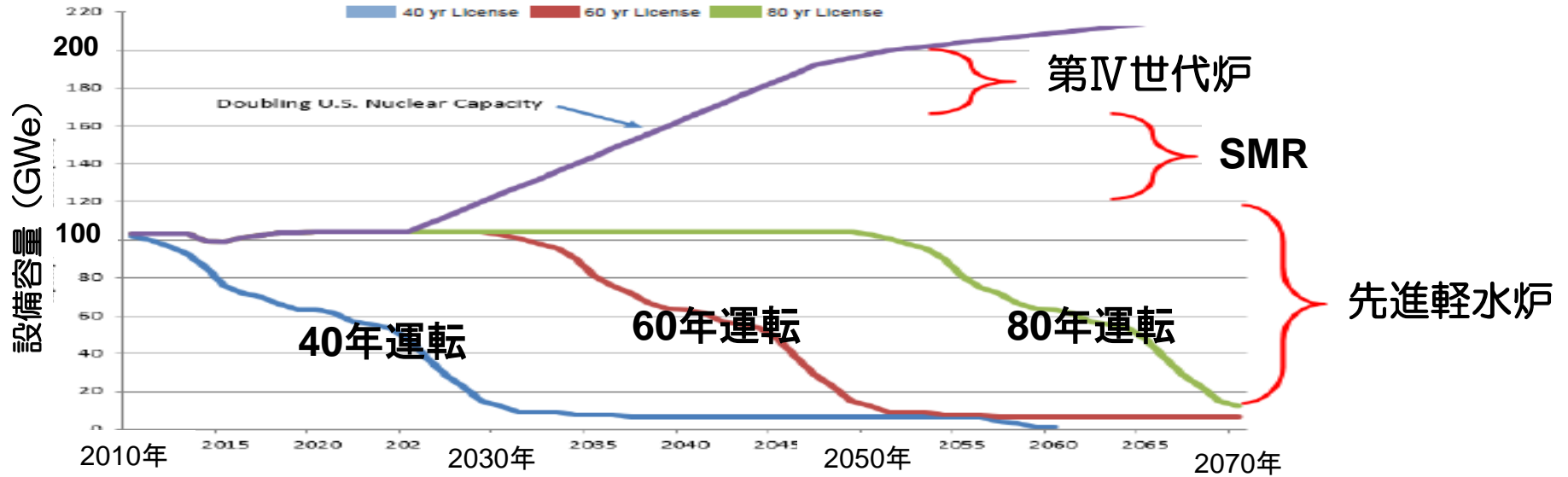
SMRにおいては、これまでの大型軽水炉に比べ革新的な技術が採用されることから、安全規制上の許認可の見通しが不透明であり、審査に対応するベンダーや発電事業者の負担が大きくなることが予想される。現在、米国、カナダにおいては、規制機関において具体的な審査が進められており、その結果が注目される。

■ 米国

- DOEにおいては、新しい原子力技術に関する許認可対応を支援する制度（**LTS**（Licensing Technical Support program））を設け、**NuScale**の軽水型SMRをその支援対象とした。
- NRCは、
 - NuScale（アイダホ国立研究所内に建設予定）の設計認証を受理し審査中。2018年4月に安全審査の第1フェーズを修了した。最後の第6フェーズを2020年9月に審査を終了するとのスケジュールを公表。
 - その他、軽水炉型2件（BWXT mPower、SMR-160）、小型高速炉1件（Oklo）、熔融塩炉4件（Transatomic、IMSR、MCFR、KP-FHR）、高温ガス炉1件（Xe-100）について Pre-Application 評価中。なお、更に何件か非軽水炉型のPre-Applicationが、見込まれている。
 - また、TVAが Clinch River Nuclear (CRN) site に複数のSMRを設置するとの Early Site Permit を申請
 - SMRの審査上の課題（ソースタームの計算方法、緊急時計画の要件、など）について、10数件に亘り検討。その多くは、SMRとnon-LWRに共通のもの。

米国エネルギー省のビジョンと規制対応

- 21世紀までを展望し、産業用熱供給から輸送部門の需要にも対応するため、2050年までに原子力の容量を現在の倍に。大型軽水炉、SMR、第IV世代炉が組み合わさって利用されると想定。NRCも必要な規制対応を進めているところ。



2020年

2025年

2030年

2035年

(出典：US DOE 資料)

SMRに対する安全規制（2）

■ カナダ

- 規制機関**CNSC**（Canadian Nuclear Safety Commission）は、
 - 正式な許認可手続きとは異なるサービスとしてベンダーに対する原子炉設計の**事前審査（Pre-Licensing Vendor Design Review）**を行っている。フェーズ1において、設計が規制基準全般に亘り適合しているかを評価（12～18ヶ月）、フェーズ2において、許認可上障害となる可能性のある点を同定する詳細な評価（約24ヶ月）が行われる。2018年8月時点で、SMR10件が申請されており、2件の軽水炉以外の8件が非軽水炉型SMRとなっている。既に1件は、フェーズ1を終了、4件がフェーズ1の途上、1件がフェーズ1を中断、4件が審査に向けて調整中である。
 - SMRの規制上の課題を整理（DIS-16-04）、許認可のためのガイドを策定中。

■ IAEA

- **RCF（Regulatory Cooperation Forum）**
 - RCFは、IAEAの安全基準に基づく協力を基礎として、各国の規制機関（幹部）が規制に関する知識や経験の共有を図るフォーラム
 - 2017年9月22日、IAEA 61st General Conferenceの Side Events として、第8回RCF会合が開催され、SMRに特化した許認可プロセスをテーマとして取り上げた。その後、技術会合やワークショップなどの活動がPilot Projectとして行われ、2018年1月規制上の課題を取り上げた報告書が作成された。今後、安全要件設定に関して包括的な指導要綱も作成する模様。

カナダにおけるSMRへの規制対応

(カナダCNSCの事前設計評価の対象リスト) 2018年8月現在

開発者	炉の名称(炉型)	出力(MW-e)	申請フェーズ	評価開始日	評価状況
Terrestrial Energy Inc.	IMSR (改良型溶融塩炉)	200	1	2016年4月	終了
			2	2019年初(未定)	協定締結
NuScale Power, LLC	NuScale Integral PWR (軽水炉)	50	2	2019年初(未定)	協定調整中
Ultra Safe Nuclear Corp. / Global First Power	MMR-5、MMR-10 (高温ガス炉)	5~10	1	2016年12月	2018年10月終了予定
			2	2018年末(未定)	協定締結
Westinghouse Electric Company, LLC	eVinci Micro Reactor Solid core and heat pipes (ヒートパイプ炉)	25以下 (種々の出力レベル)	2	2019年初(未定)	協定調整中
LeadCold Nuclear Inc.	SEALER (溶融鉛炉)	3	1	2017年1月	ベンダーの要請で保留
Advanced Reactor Concepts Ltd.	ARC-100 (液体ナトリウム炉)	100	1	2017年秋	実施中
URENCO	U-Battery (高温ガス炉)	4	1	未定	協定調整中
Moltex Energy	Moltex Energy Stable Salt Reactor (溶融鉛炉)	300	1 & 2	2017年12月	実施中
SMR, LLC. (A Holtec International Co.)	SMR-160 (加圧軽水炉)	160	1	2018年7月	実施中
StarCore Nuclear	StarCore Module (高温ガス炉)	10	1 & 2	未定	協定調整中

SMRのサプライチェーン

SMRにおいては、これまでの大型軽水炉と異なるサプライチェーンを構築しようとの動きが各国に見られる。先端的な技術を要するものと、汎用品のようなものを組み合わせて製造するなど、新たな取り組みが期待される。

■ 米国

- 先進的製造技術に取り組む**先進的原子力製造センター (CANM)**が発足するなど、原子力機器の製造技術復活に向けての積極的な取り組みが行われている。
(**NuScaleのSG開発**も実施予定)

■ 英国

- 2017年7月、**原子力先端製造研究センター (Nuclear AMRC)**を開設、製造技術の開発に取り組んでいる

- 大量生産型標準炉に係る国際的な原子炉設計認証システムの構築が求められる
- 原子力設備(特に原子炉モジュール)に対する国境を越えた検査システムも必要

変化する電力市場におけるSMRの位置づけ

SMRは、従来の大型軽水炉と同じ利用方法やエネルギーミックスにおける位置づけでは、大型炉に対する競争力は限られると考えられる。しかし、電力市場自体が変化する中で、SMR独自の普及シナリオも考えられる。

■ 高い安全性と地球温暖化対策への社会的要請

- パッシブ系の採用や災害時の避難範囲の縮小によって相対的に社会の受容性が高まる可能性
- パリ協定への対応のため、化石燃料の使用が制限された場合、その代替電源としての活用

■ 小規模グリッドや遠隔地での電源

- 送配電網が未発達の上中下国や、需要量が限定された遠隔地、といったニッチなニーズへの対応

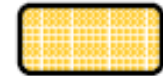
■ 再生可能エネルギーの調整力

- 再生可能電源の設置場所の近辺に設置し、出力の一部を需給調整力として活用（収益力向上）。また、託送のコストも低減。

■ 熱電併給システム

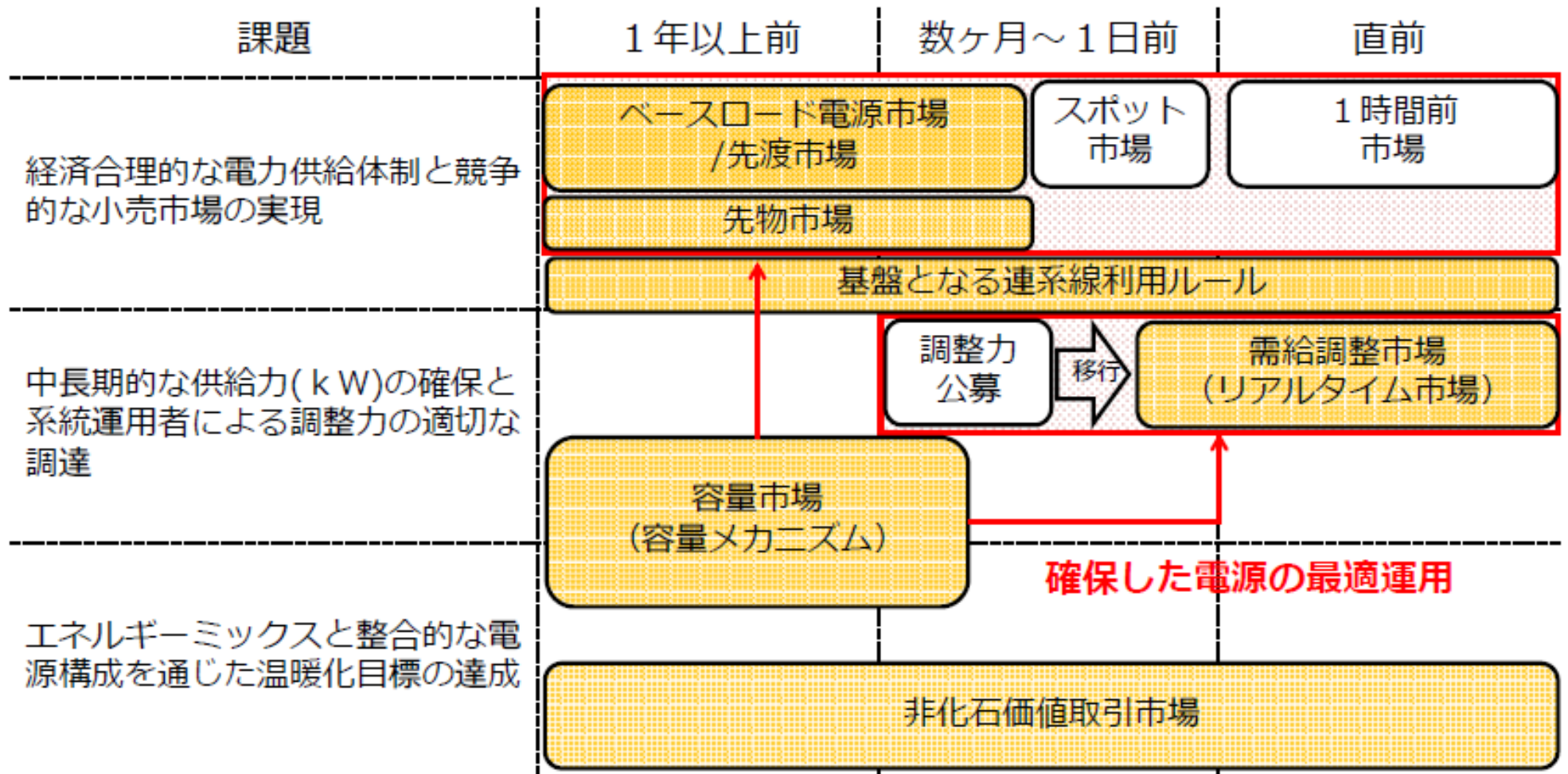
- 需要地の近くに設置することにより、電気だけでなく熱供給も低コストで実施可能となる（総合エネルギー事業としての展開）

将来の電力市場のイメージ



: 今後整備すべき市場

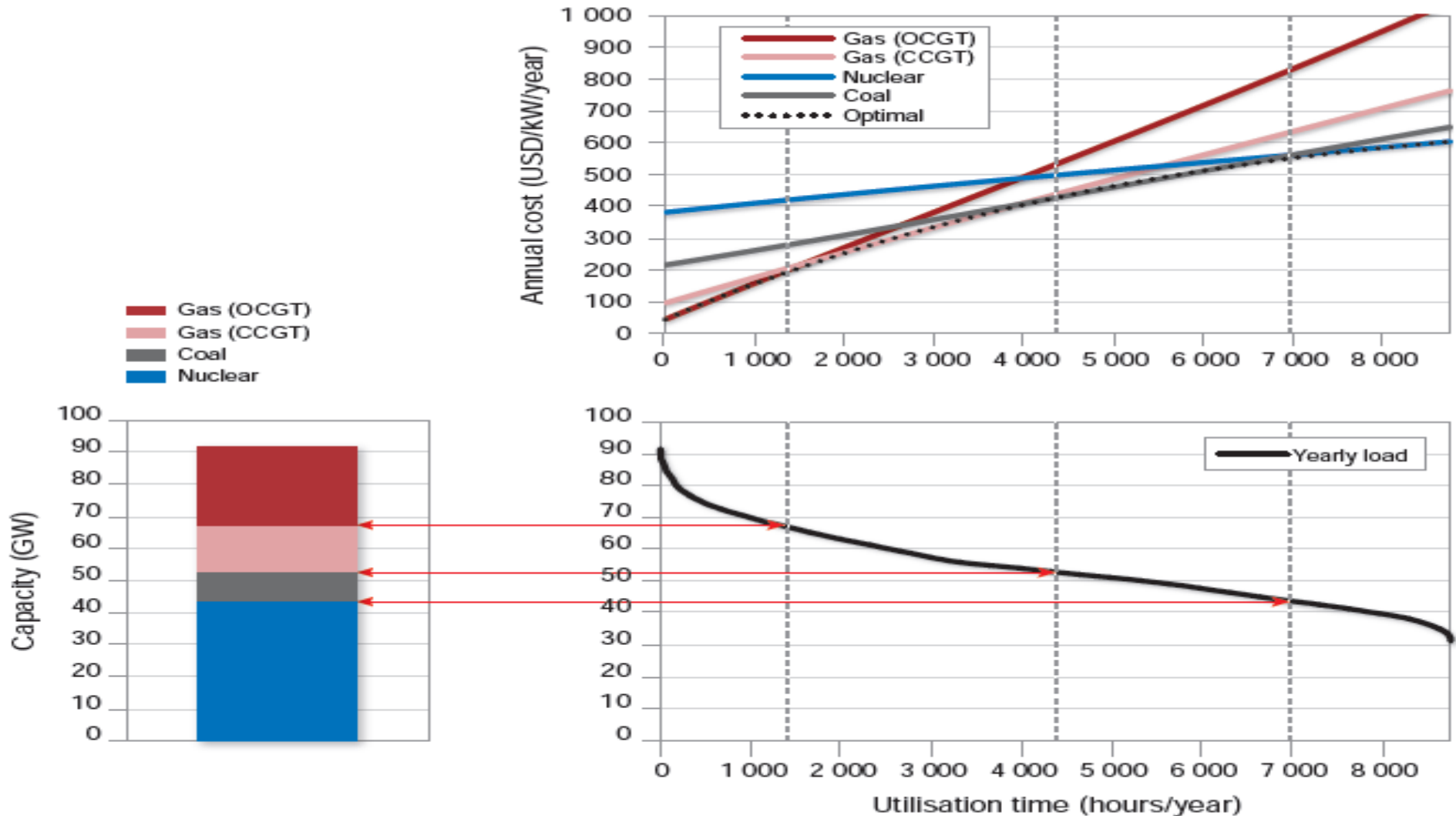
実需給と取引時期の関係



※新市場における取引時期については、今後の検討によって変動しうる。

(出典:資源エネルギー庁資料)

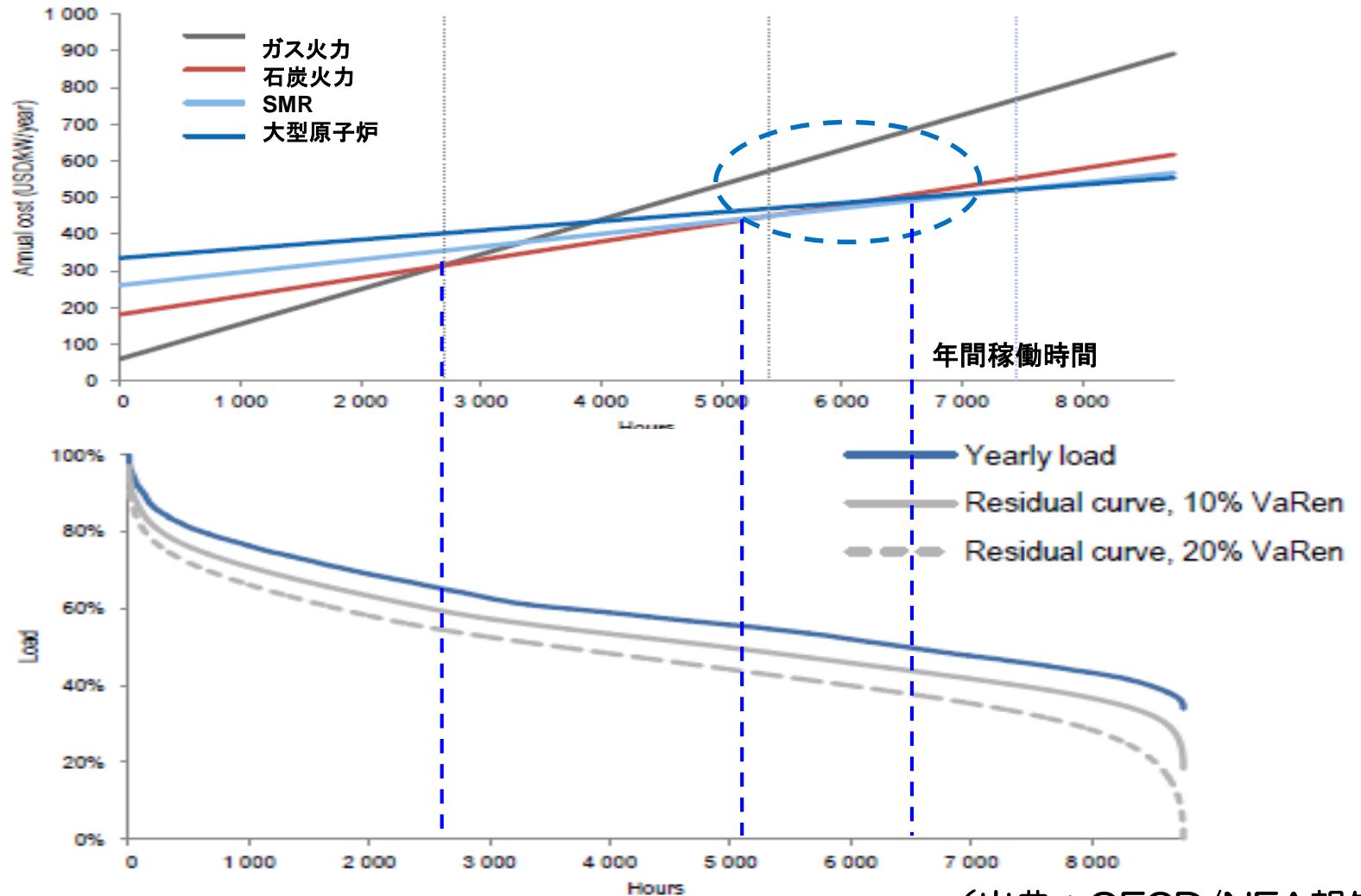
発電コストとエネルギーミックス



Source: Jones, 2012.

(出典：OECD/NEA報告書)

エネルギーミックスにおけるSMRの位置づけ

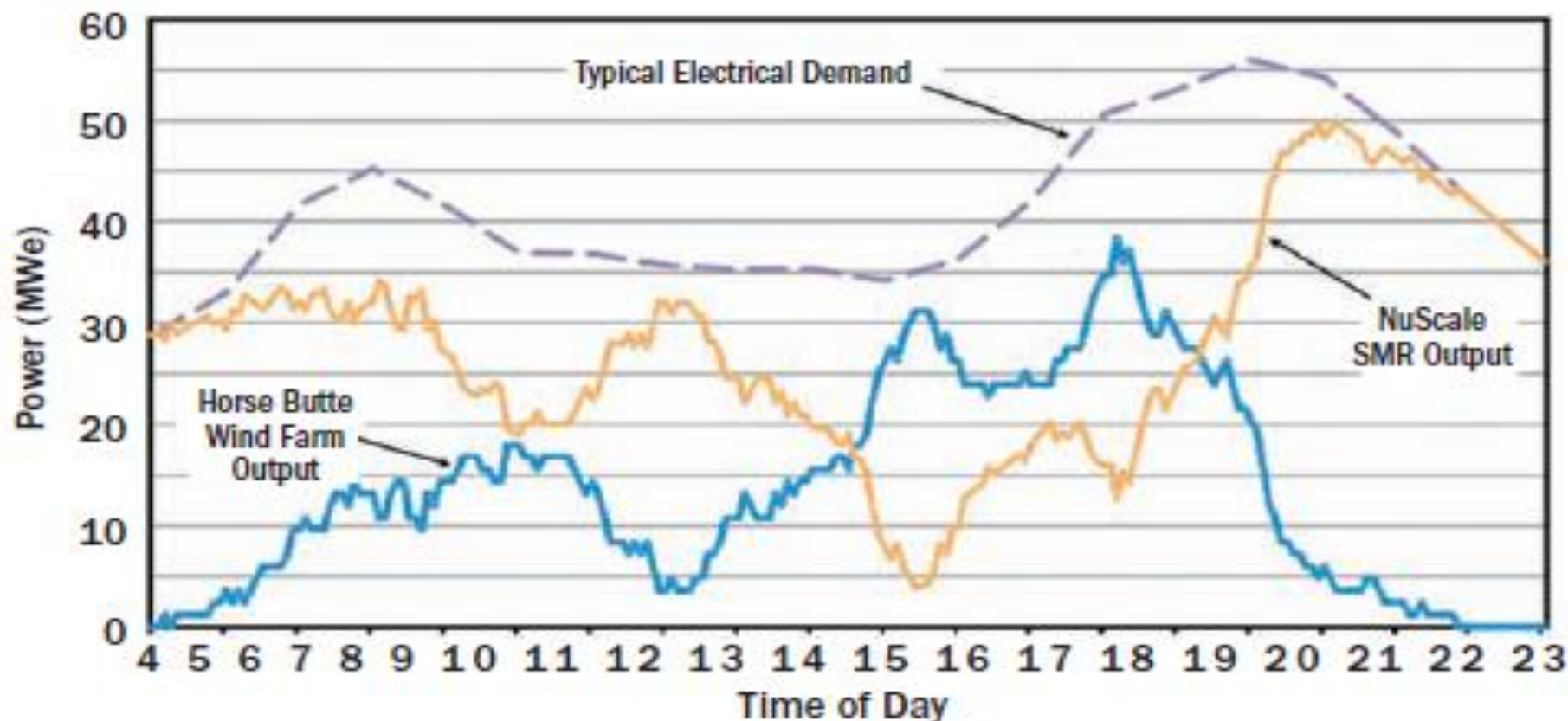


Source: Based on model in NEA, 2012.

(出典：OECD/NEA報告書)

SMRによる再生可能エネルギーの出力変動調整

Balancing the Electrical Output of a Wind Farm with an SMR

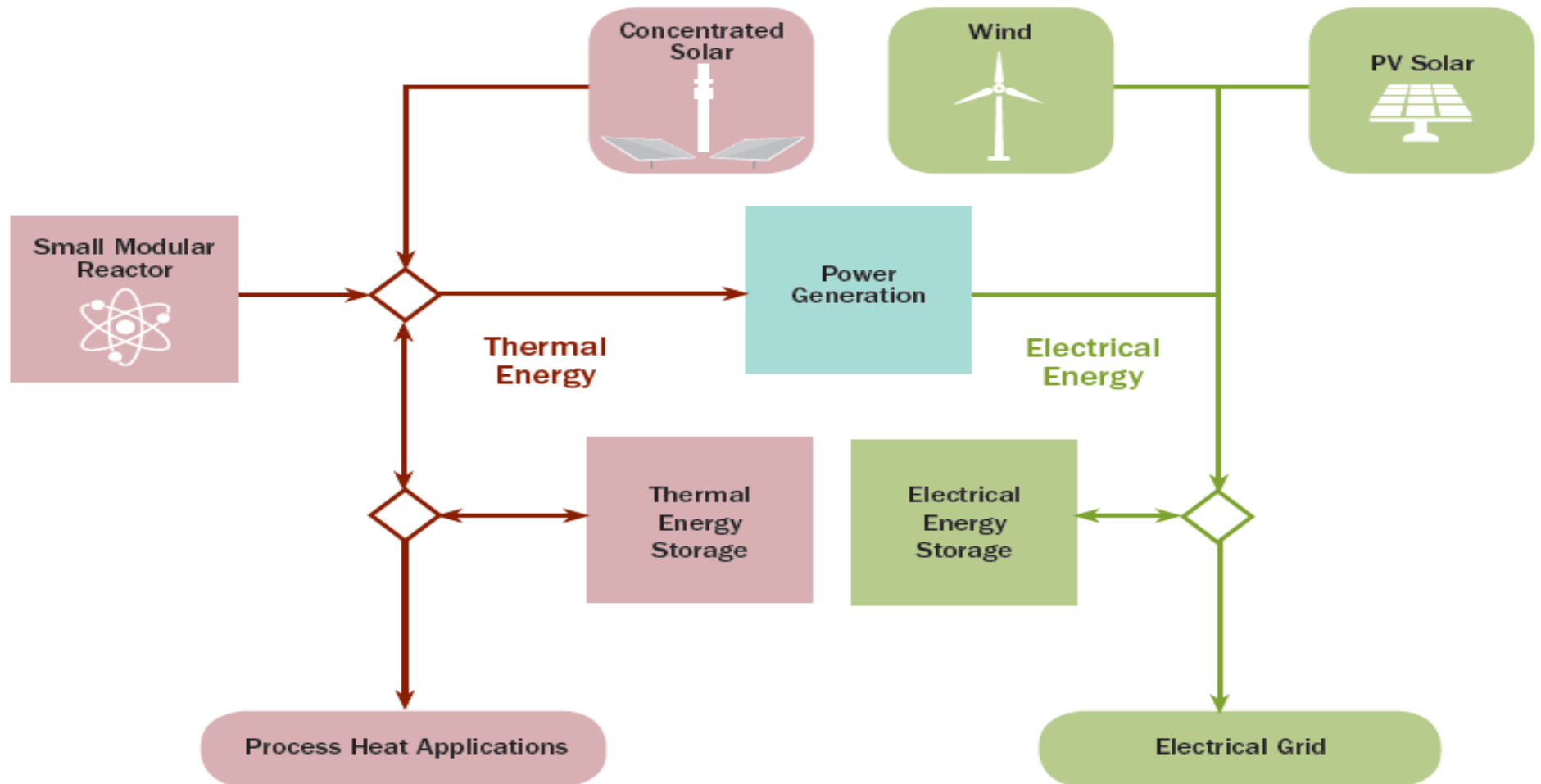


Source: Ingersoll et al, "Can Nuclear Power and Renewables be Friends?"
Proceedings of ICAPP 2015, May 3-6, 2015.

(出典：Nuclear Innovation Alliance 報告書)

SMRと再生可能エネルギーのハイブリッドシステム

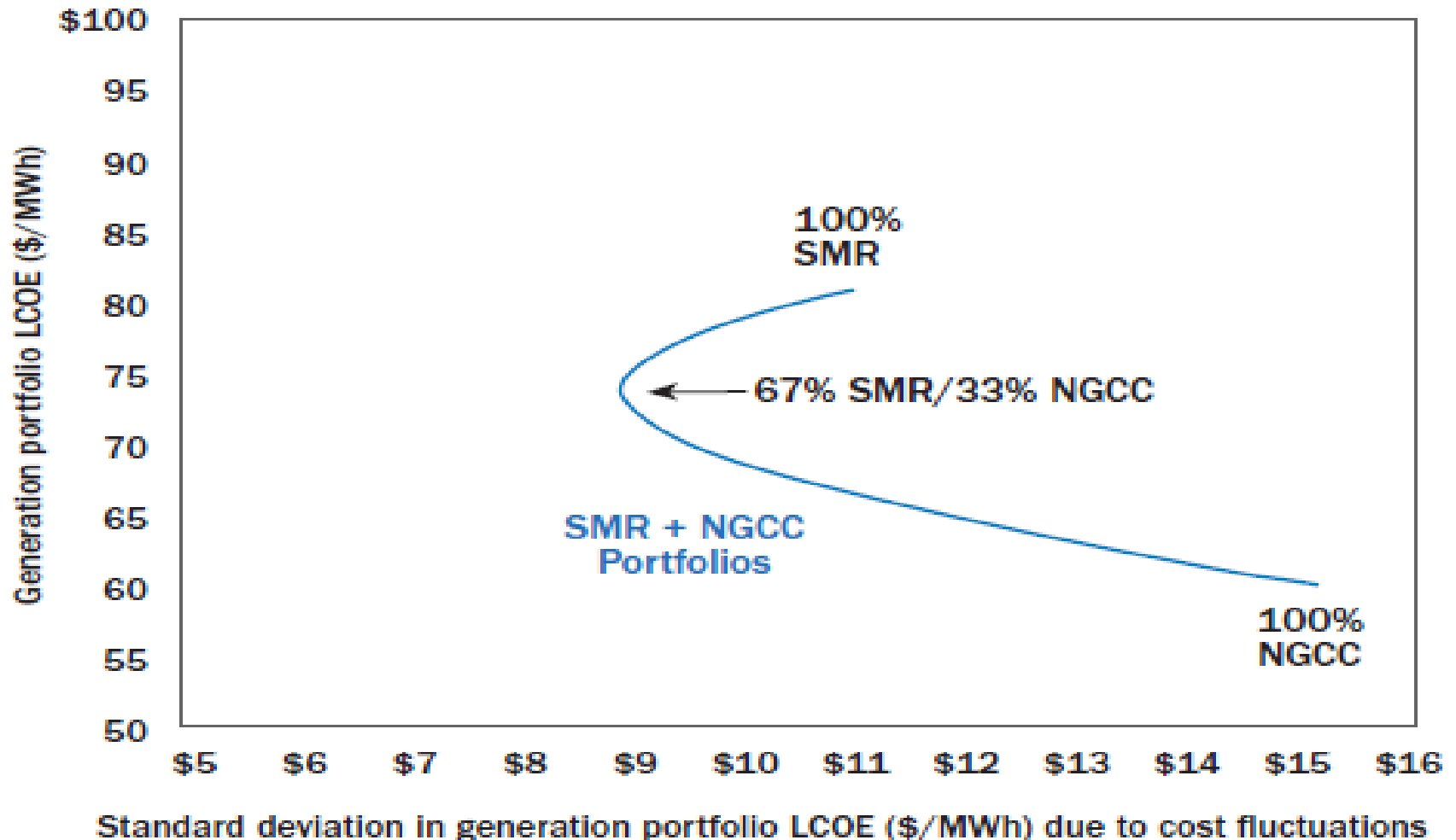
Hybrid Energy Systems with SMRs, Solar Plants, and Wind Power



Source: Idaho National Laboratory has created similar hybrid energy system graphics. See, for example, slide 10 of a presentation by Shannon Bragg-Sitton and Richard Boardman, "Integrated Nuclear Renewable Energy Systems Development," given to the IAEA Flexible Operations Technical Meeting on October 7, 2014.

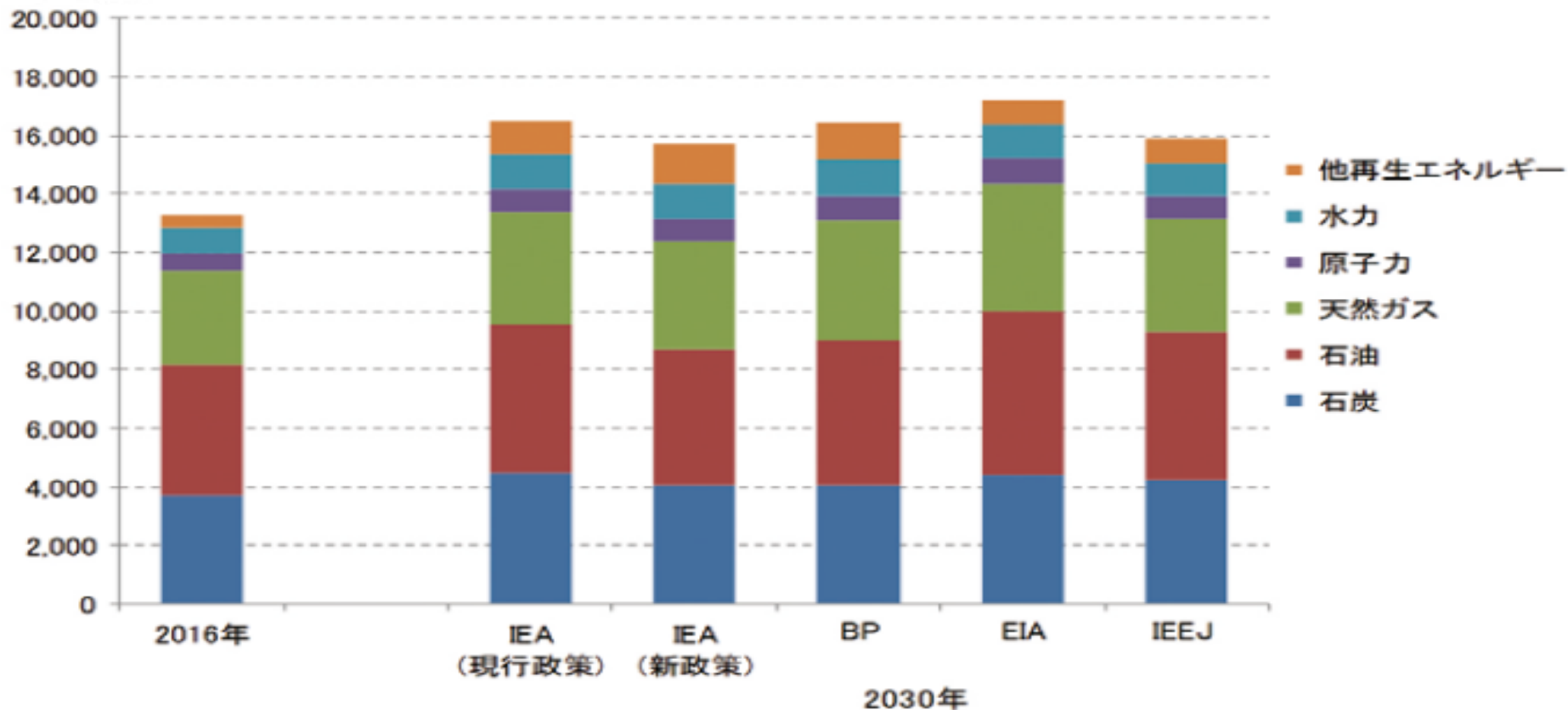
燃料費変動リスクに対応するSMRの活用

Electricity Generating Portfolios with SMRs and NGCC Plants



世界のエネルギー需給予測（2030年）

(100万石油換算トン)



(注1) EIA、IEEJはレファレンスケース。

(注2) 他再生エネルギーは風力、太陽光、地熱、バイオマス等の再生可能エネルギー発電である。

(注3) 原子力、水力、他再生可能エネルギー発電はBPに従って、一次エネルギーから電力への転換率を38%とする。

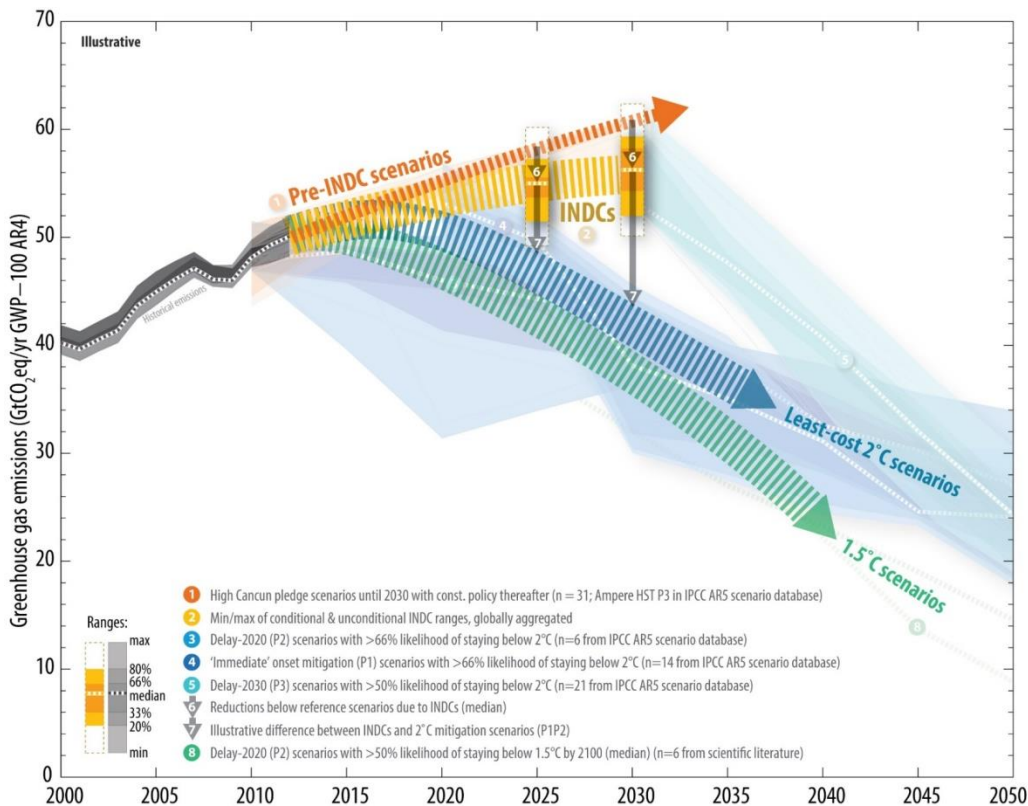
出典：BP「Statistical review of world energy 2017」、EIA「Energy Outlook 2035：January 2017」、IEA「World Energy Outlook 2017」、EIA「International Energy Outlook 2016」、日本エネルギー経済研究所（IEEJ）「IEEJアウトルック 2018」を基に作成

(出典：平成29年度「エネルギーに関する年次報告」（エネルギー白書）)

2050年における世界の電力需給（例）

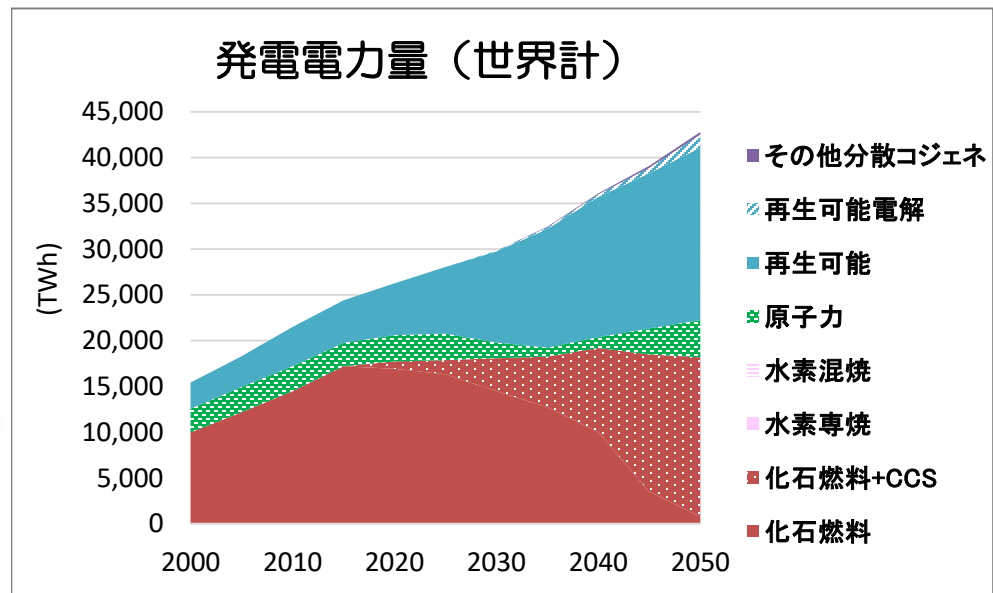
2050年までに大規模CO2削減（80%減）の
場合の世界の電力需給予測
（CCSあり、原子力制約あり、のケース）

温暖化ガス削減シナリオ



（出典：UNFCCC (2016, May 2)）

発電電力量（世界計）



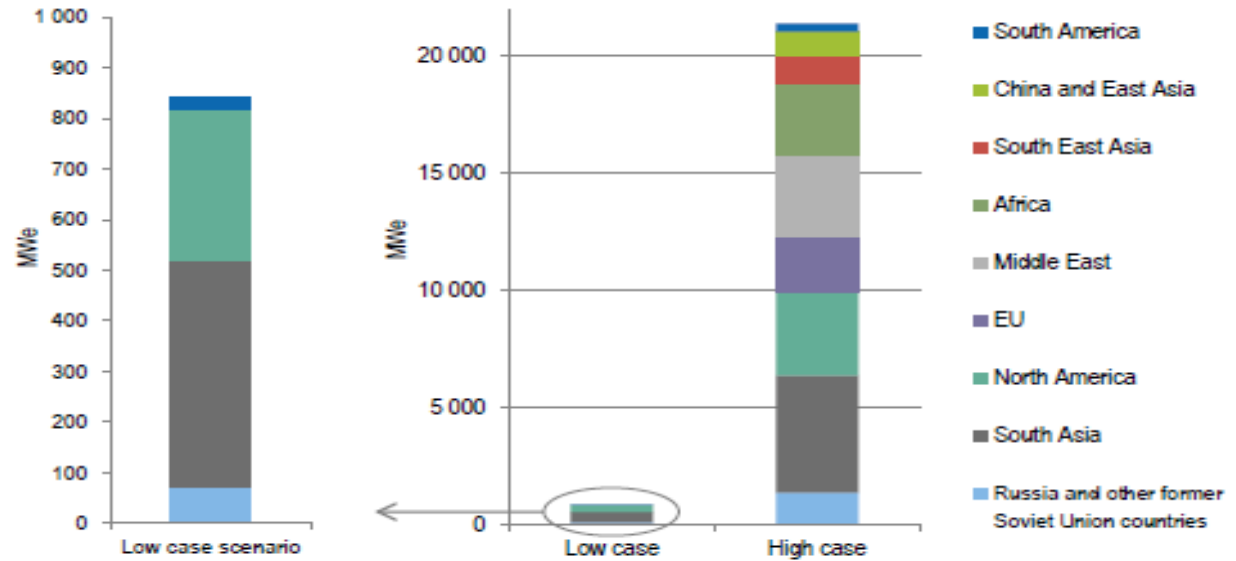
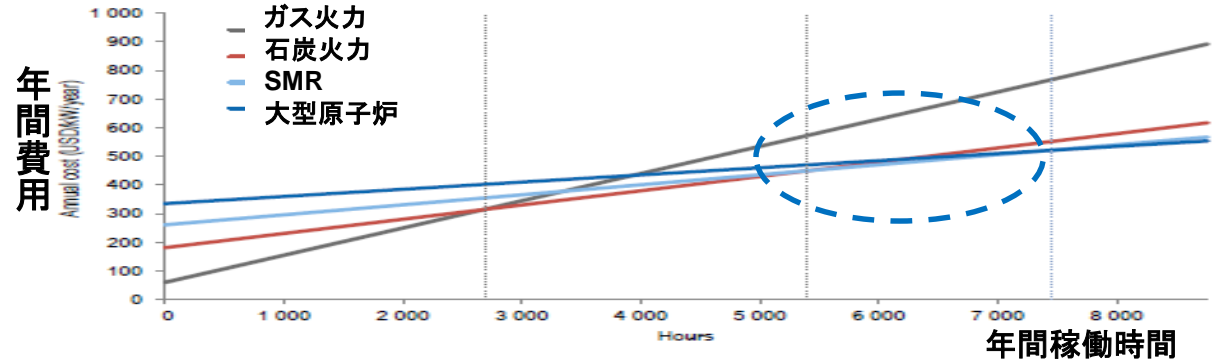
（出典：エネ総研分析資料）

SMRの普及予測（1）

■ 経済協力開発機構/原子力機関（OECD/NEA）

- 報告書「**Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment**」での分析結果

- 部分負荷60～85%の範囲では、SMR(成熟機)が最も安価との分析
- 将来、化石燃料に替わり調整電源としての利用も考えられる。
- SMRの設備容量に関して、2035年時点における、世界の地域別に予測
 - ✓ Highケースでは、新規に建設される原子炉の9%、21GWe
 - ✓ Lowケースでは、大幅に低下し、1GWeにも達しない。地域もほぼ北米と南アジアに限られている。
 - ✓ 条件が不確定なため、予測が困難な状況と考えられる。



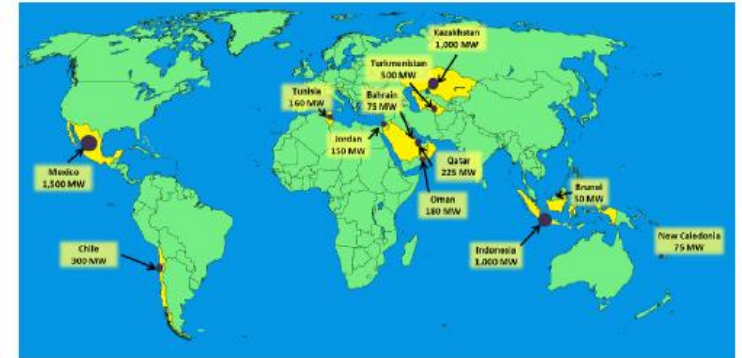
Source: NEA calculations based on analysis in the text.

(出典：OECD/NEA報告書)

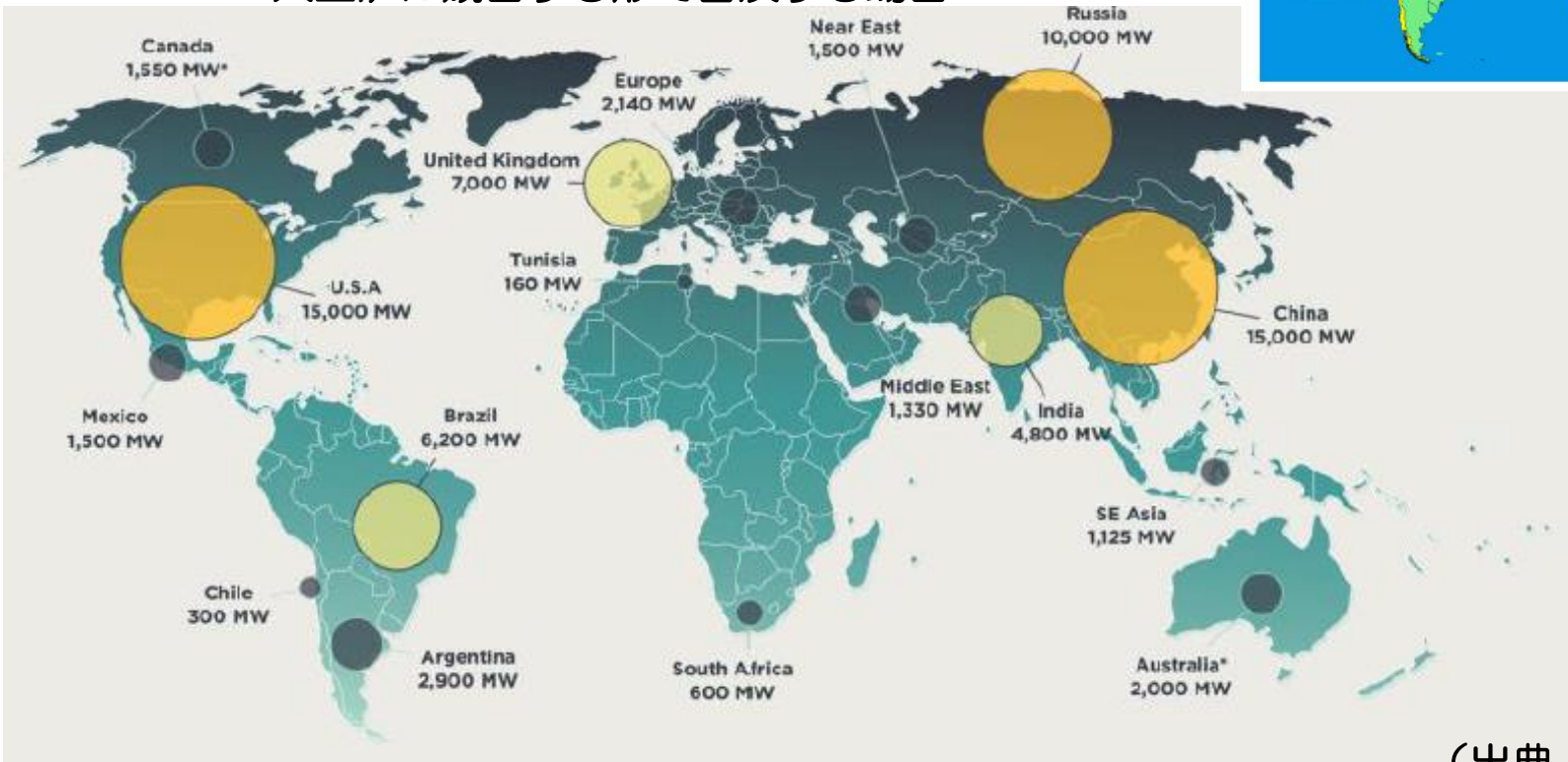
SMRの普及予測 (2)

英国国立原子力研究所 (NNL) は、SMRが経済性において大型炉と同等な競争力を持つ場合、2035年の潜在的な市場規模は、**65~85 GW**となると試算している。

Nicheな市場のみに普及する場合



大型炉に競合する形で普及する場合



(出典：UK NNL報告書)

まとめ

SMRが、その期待に応えられるか否かは、先ず、先行している軽水型SMRの今後の開発動向に注目し、以下の課題への対応可能性を見ることが必要。

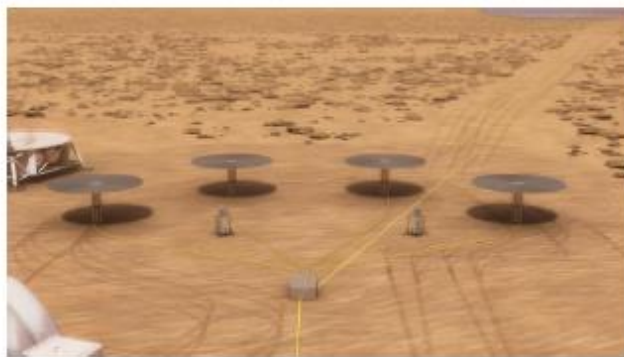
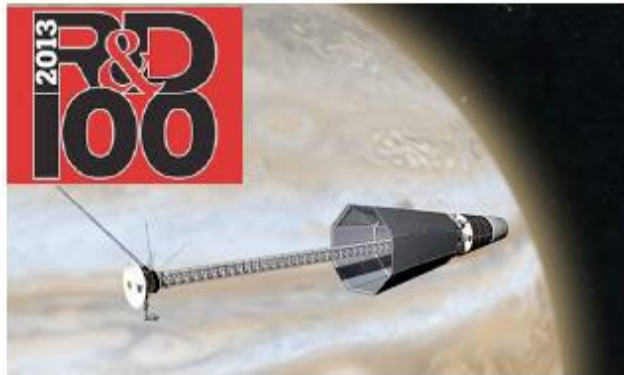
【課題】

- 標準炉として世界に数多く普及するためには、経済性において、大型炉と競争力を持つこと
 - 小規模グリッドや遠隔地のみでの活用では、普及は限定的（ニッチな市場）
 - 小型化に伴うコスト面のメリット（シンプルな構造、機器類の削減、メンテナンスの容易さ、防災エリアの大幅縮小、運転人員の削減、など）
- 各国の安全審査・検査が迅速に進むよう、国際的なルール作りが行われること
 - 標準設計炉に対する安全審査結果の国際的な相互承認制度の創設、など
 - ベンダーに対する国境を越えた検査制度
- 再生可能エネルギーと組み合わせた活用の可能性を示すこと
 - 再生可能電源の設置場所の近辺に設置（託送のコストの低減）し、再生可能エネルギーの出力変動に対応した負荷調整の実施（需給調整電源としての活用）。
 - 負荷調整に伴い、余剰のエネルギーを熱として産業部門等に活用するシステムづくり

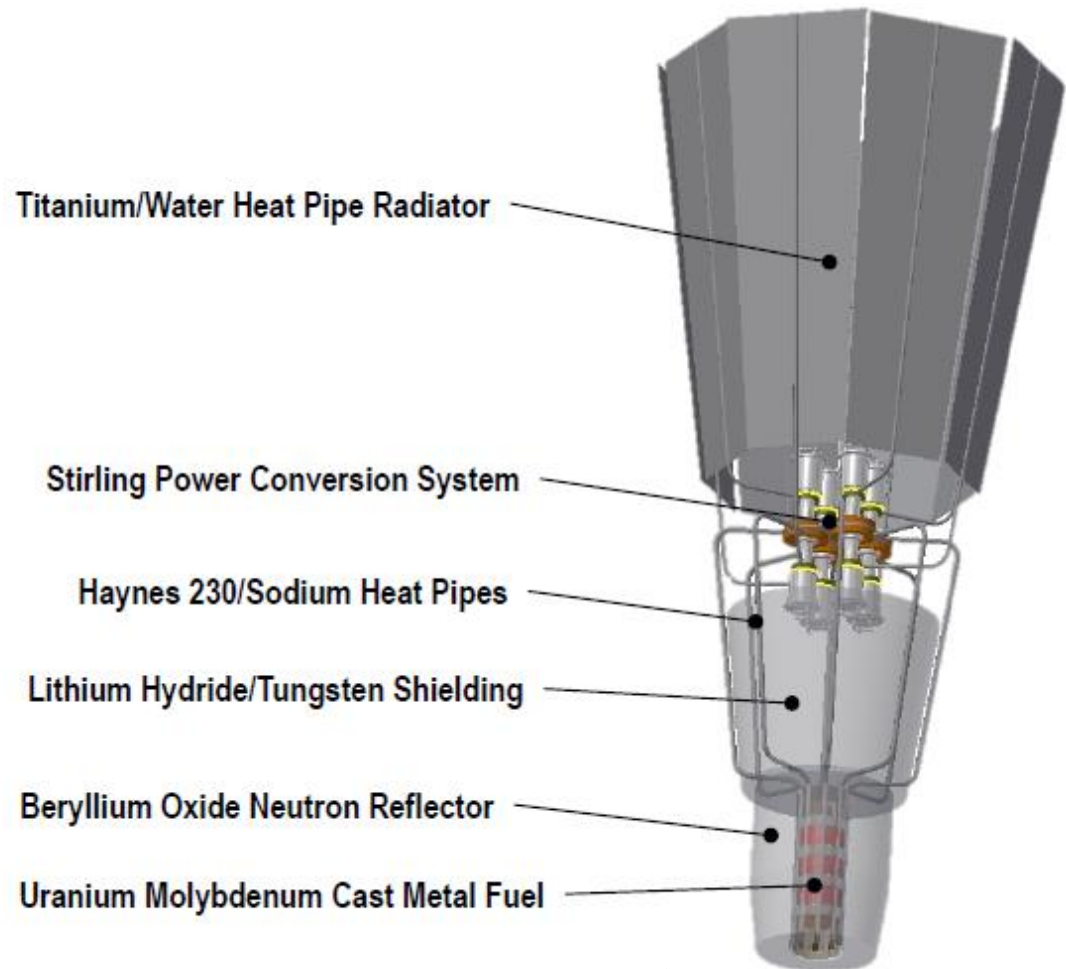
(参考) 宇宙開発と超小型原子炉…若手に夢を

NASA Kilopower System (出力: 1~10kWe) のイメージ

Possible Mission Configurations



(Artist's Concepts)



(出典: NASA 資料)