
2022年SNWシンポジウム、エネルギー安全保障と原子力の積極活用、
2022年9月16日(金)

原子力の持続的活用に向けた 展望と課題

東京大学 大学院工学系研究科 教授
小宮山 涼一



THE UNIVERSITY OF TOKYO

日本のエネルギー問題

● 化石燃料中心のエネルギー供給、世界有数のエネルギー消費国

- ・ 比率(2020年) 石油:38%、石炭:27%、ガス:22%、原子力:2%、再エネ:11% (化石燃料:87%)
- ・ 一次エネルギー消費:世界5位、石油消費:世界5位、石油輸入:世界4位、LNG輸入:世界1位、石炭輸入:世界2位

● 極めて低いエネルギー自給率、高止まりするエネルギー輸入依存度・中東依存度

- ・ エネルギー自給率は12%、化石資源はほぼ全量を輸入、原油輸入の約9割(89.6%)を中東に依存(2019年度)

● 国際エネルギー情勢の構造的変化

- ・ 中国やインド等のエネルギー需要の増大、地政学的リスクの顕在化、エネルギー価格の高騰、エネルギー資源の獲得競争

● 環境制約と持続可能性への対応

- ・ 2030年度の温室効果ガス排出量46%削減(2013年度比)、2050年ネットゼロ(カーボンニュートラル)

● 再生可能エネルギー大量導入への対応

- ・ 調整力・送配電容量・系統安定性の確保、FIT賦課金の上昇、再エネとの共生

● 自然災害等によるエネルギー安定供給への影響

- ・ 地震、大雨、洪水、台風等の自然災害や不測の事態によるエネルギー供給支障(停電等)の顕在化

● 産業競争力の強化、経済成長の実現

原子力発電を巡るエネルギー情勢

● カーボンニュートラルの実現

- 先進各国、中国、インドなど今世紀中期以降のカーボンニュートラル実現を宣言
- グラスゴー気候合意(COP26)：1.5℃目標の追求→世界でカーボンニュートラル実現が必要

● エネルギーセキュリティの強化

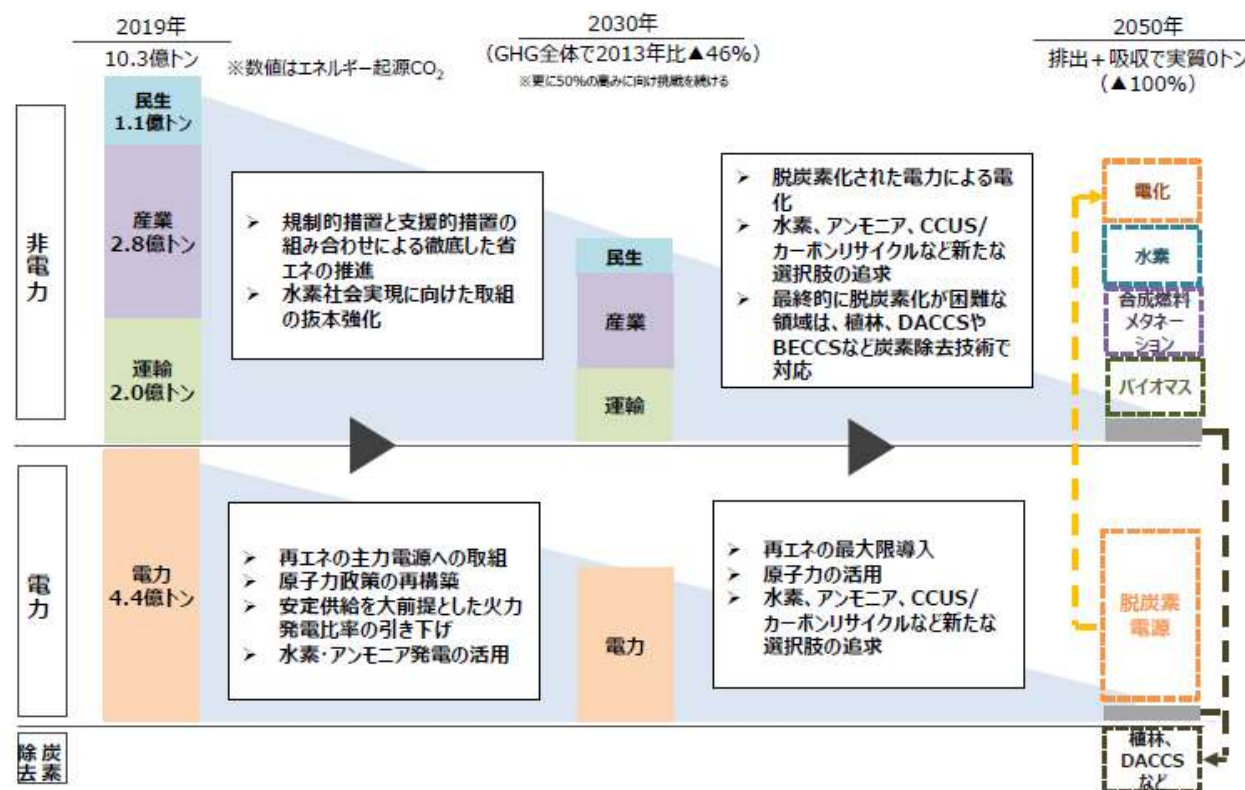
- ウクライナ危機による国際的なエネルギー供給量の低下→エネルギー価格高騰
- ロシア：石油輸出は米国やサウジアラビアと同水準の世界の約 1 割、天然ガス輸出は世界の 4 分の 1 を占める世界最大の輸出国（日本の輸入量の1割弱、サハリン 2 を巡る動向の不確実性）、石炭輸出でも世界 3 位

● 国際的な原子力エネルギーの再評価

- アメリカ、カナダ、イギリスなど欧州、中国など世界的に次世代原発の開発や社会実装に向けた取り組みを強化
- アメリカ：長期にわたり十分な建設プロジェクトが無かったことにより、原子炉の建設が長期化、建設費用が高騰。原子炉の投資リスクの低減のため、小型原子炉の開発に取り組む。小型軽水炉を2030年ごろに建設するため、企業や規制当局等が、政府支援の下で、精力的に取り組む。
- イギリス：原子力比率を現状の15%から2050年までに25%まで拡大することを目指し、原子力導入拡大を進める。過去の建設実績を有効活用できる高温ガス炉開発等にも取り組んでいます。
- フランス：原子力低減する目標を撤回、2050年までに革新型軽水炉6基を建設し、さらに8基の建設に向けた検討を開始する方針を表明(計14基)、また小型炉など革新炉の開発に向けた政府支援を決定。
- 中国：世界で建設中原子炉の大半を占める。高温ガス炉、高速炉開発なども積極的に推進。

2050年までのカーボンニュートラル(CN: Carbon Neutrality)

- 脱炭素化の基本戦略→省エネ、燃料転換(クリーンエネルギー導入)、CCUS
- 電力脱炭素化、電化、水素・合成燃料、CCUS(ネガティブエミッション技術)、吸収源の拡大(植林等)ほか

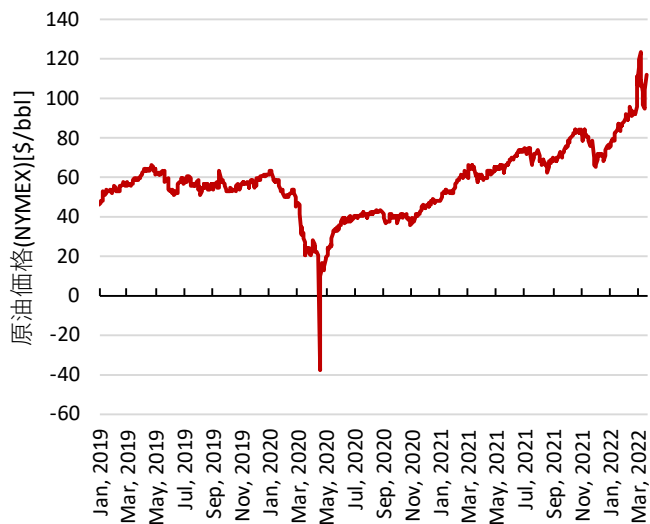


(出典) 経済産業省：2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(令和3年6月18日)
<<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-4.pdf>>

エネルギー安全保障

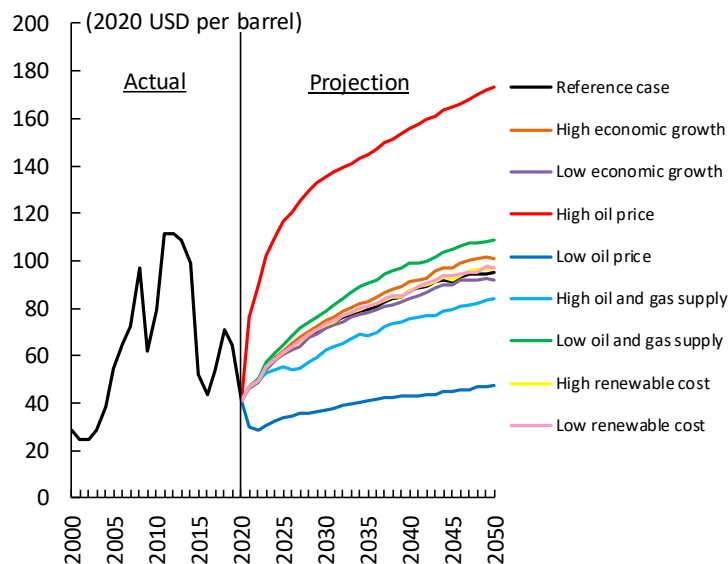
- 原油価格はこれまで大きく変動、今後の推移も不確実性が高い(地政学的リスク等)
- 欧州：ウクライナ情勢をめぐる地政学的リスクの顕在化、エネルギー情勢の深刻化
 - ・ 「REPowerEU」計画(2022年3月)：省エネ推進、再エネ普及拡大、ガス調達源の分散化によるロシア依存低減
 - ・ フランス：原子力発電の新設計画を発表(最大14基)→原子力に対する再評価の動きの顕在化
- CNへの移行過程(トランジション)では依然、化石燃料に依存→化石燃料の資源開発、インフラへの投資の確保、エネルギー調達リスクへの対応など、エネルギー安全保障問題への対策強化は重要な課題

原油価格(NYMEX)の推移



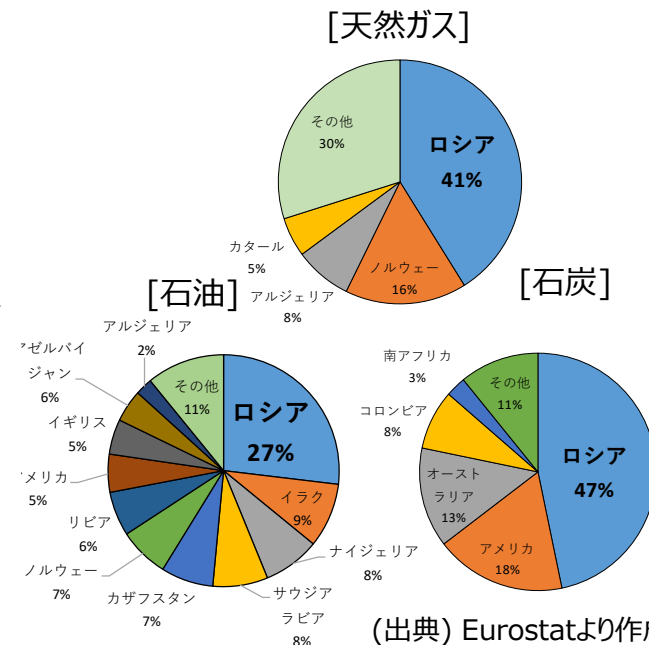
(出典) 米国エネルギー省(EIA/DOE)統計データより作成

原油価格(ブレント原油)の展望



(出典) 米国エネルギー省(EIA/DOE): Annual Energy Outlook 2021より作成

欧州の国別輸入比率(2019年)



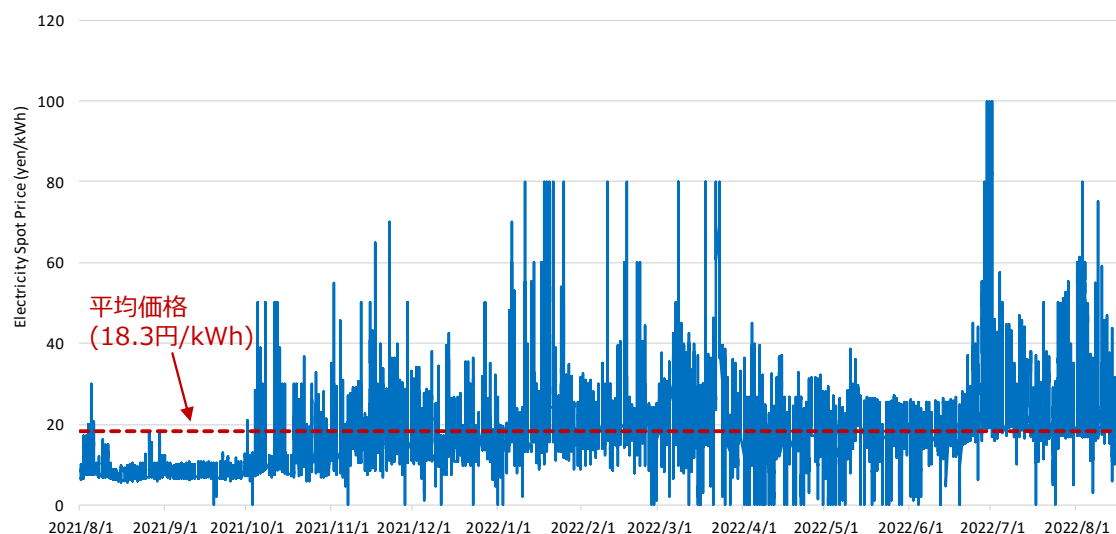
(出典) Eurostatより作成

電力需給の情勢

■ 電力価格の高騰、電力需給ひっ迫リスクの高まり

- ・ ウクライナ危機等を背景とした燃料・電力価格高騰、エネルギーセキュリティへの意識の高まり
- ・ 脱炭素化、電力自由化、再エネ普及の中、火力発電所の休廃止が近年増加
- ・ 2022年度冬季の電力需給は現状、厳しい見通し(多くのエリアで予備率[厳冬H1需要での需給]は3%以下)

電力スポット価格(2022年8月1日～2022年8月19日)



(出典) JEPX取引情報より作成

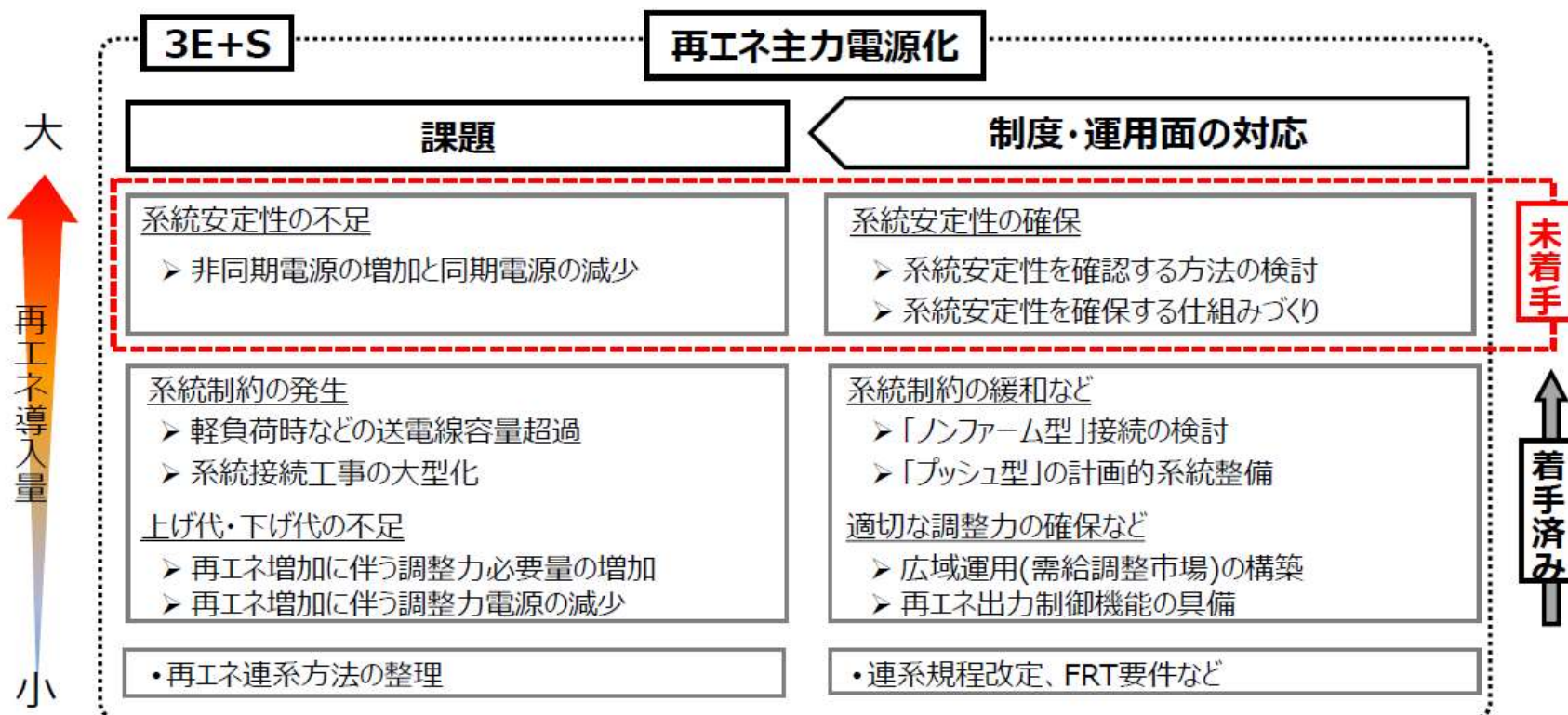
2022年12月～2023年3月の電力需給 (厳気象H1需要に対する予備率)

各エリアの予備率(厳寒H1) (6/28)				
エリア	12月	1月	2月	3月 (単位: %)
北海道	12.6	6.0	6.1	12.3
東北	7.8	1.5	1.6	12.3
東京	7.8	1.5	1.6	10.1
中部	5.5	1.9	3.4	10.1
北陸	5.5	1.9	3.4	10.1
関西	5.5	1.9	3.4	10.1
中国	5.5	1.9	3.4	10.1
四国	5.5	1.9	3.4	10.1
九州	5.5	1.9	3.4	10.1
沖縄	45.4	39.1	40.8	65.3

(出典)電力広域的運営推進機関:2022年度冬季の需給見通しについて(2022)
<https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2022/files/chousei_74_01.pdf>

再生可能エネルギー主力電源化に向けた対策

調整力の確保(上げ代、下げ代)、送電容量の確保(系統整備、ノンファーム型接続等)、系統安定性の確保(慣性力、同期化力)

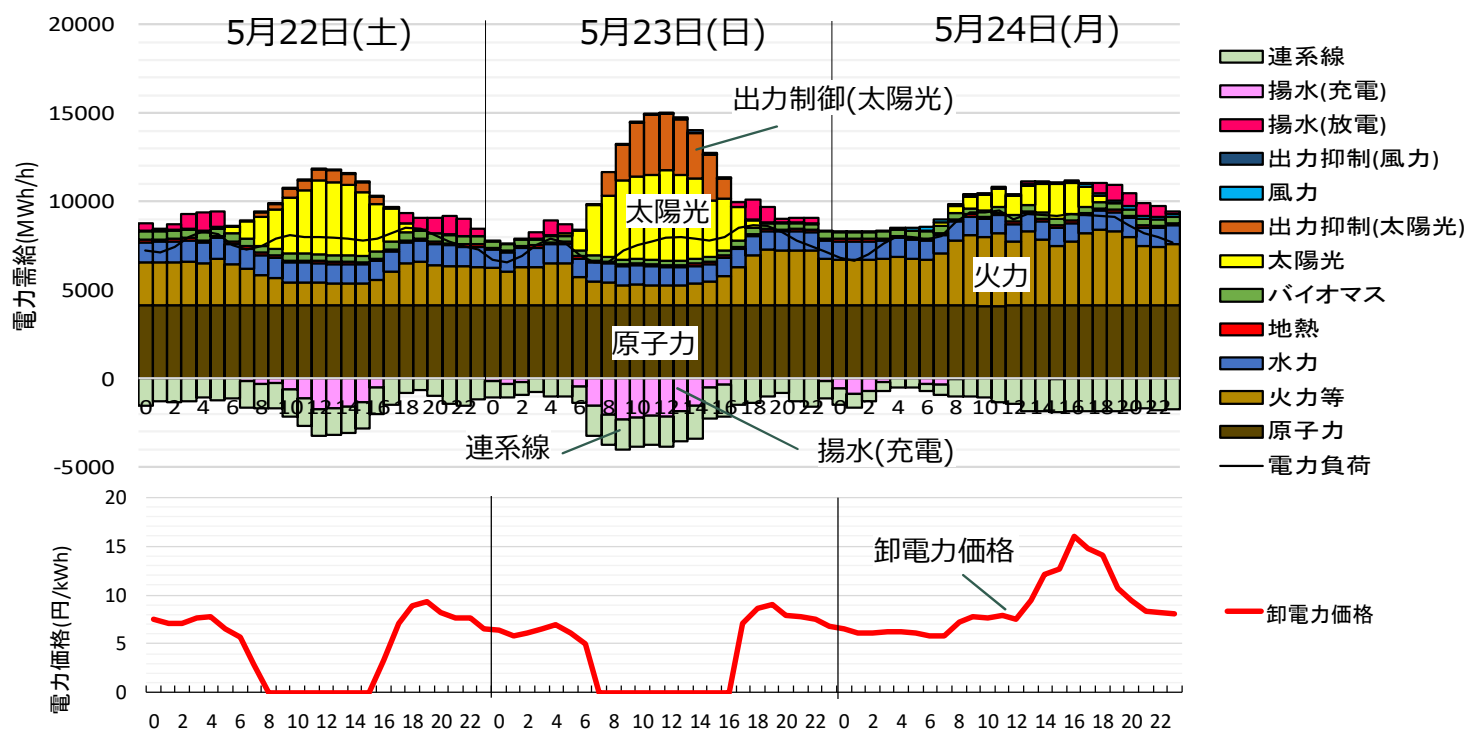


(出典)電力広域的運営推進機関：「再エネ主力電源化」に向けた技術的課題及びその対応策の検討について(2020年)
 <https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2020/files/chousei_55_03.pdf>

電力需給運用(九州地域：2021年5月22日～24日)

- 再エネ出力変動対策→火力出力抑制、揚水充電運転、連系線活用(関門連系線)、再エネ出力抑制
- 卸電力価格低下→電源新設投資インセンティブの低下、電力安定供給確保への影響

電力需給運用、卸電力価格(九州)：2021年5月22日～24日

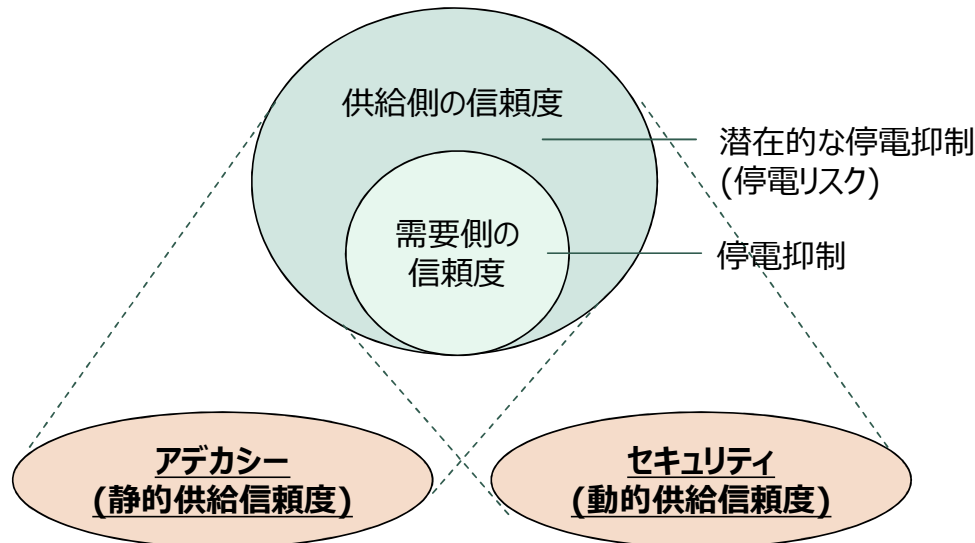


(出典) 九州電力需給情報、JEPXデータベースより作成

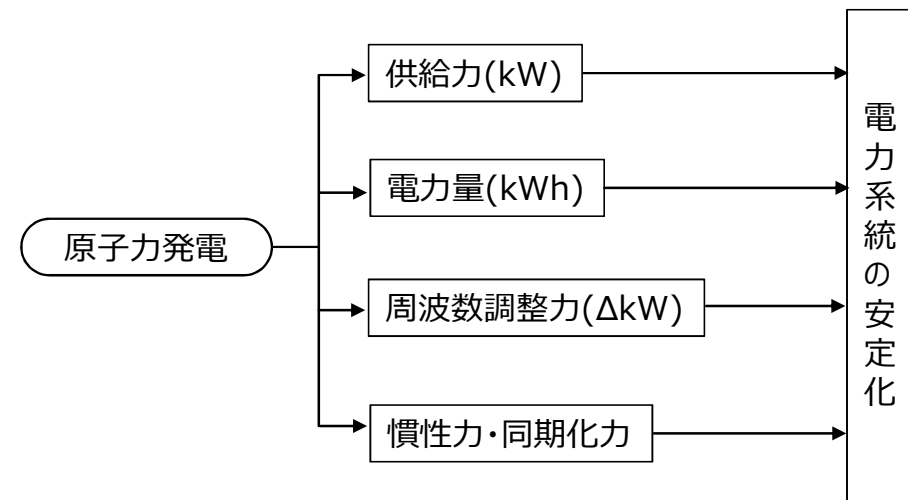
電力安定供給対策

- 電力系統安定化のためには、供給力の確保(kWの確保)、電力量の確保(kWhの確保)、周波数調整力の確保(Δ kWの確保)、慣性力・同期化力の確保等が重要
- kW、kWh、 Δ kW、慣性力・同期化力等の確保により、系統停止を回避しうる供給力(アデカシー)と系統故障の影響波及の抑制能力(セキュリティ)の強化が重要
- 原子力発電は、kW、kWh、 Δ kW、慣性力・同期化力を提供可能な能力を有し、電力系統安定化に貢献しうる技術オプション

電力系統の供給信頼度の概念



原子力発電による電力系統への貢献

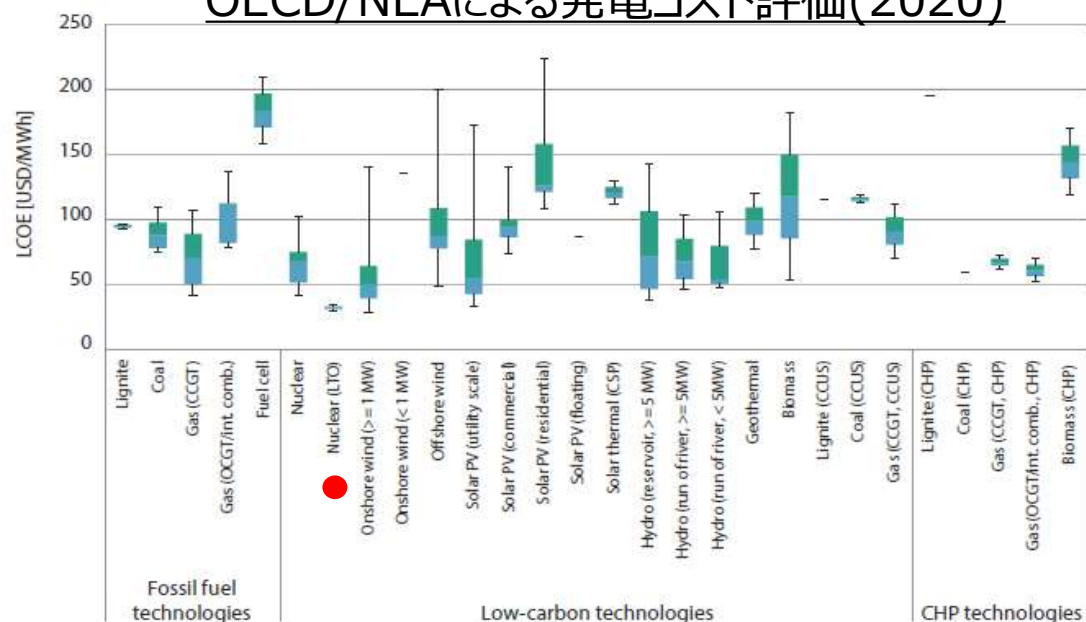


(出典)電気学会「電力自由化と系統技術」オーム社(2008年)より一部加筆修正して作成

経済性の確保(発電コスト)

- 世界的に陸上風力、事業用太陽光発電等の発電コストが、火力や原子力と同水準まで低下。再エネへの投資も世界的に旺盛。
- 一方、運転延長を行った原子力(Nuclear(LTO))は、他電源の新設と比較して最も経済優位性のあるオプション
- 電力系統への統合コスト(系統接続に必要な調整力等のコスト)を考慮の場合、事業用太陽光や陸上風力の発電コストは原子力を上回る
→電力のコストは主に、発電コストに加え、送配電等のコストで構成されるため、電力システム全体(発電、送配電等)を考慮した評価が重要
- 統合コストを考慮の場合、原子力発電コストも上昇→原子力発電の柔軟性確保も重要との示唆

OECD/NEAによる発電コスト評価(2020)

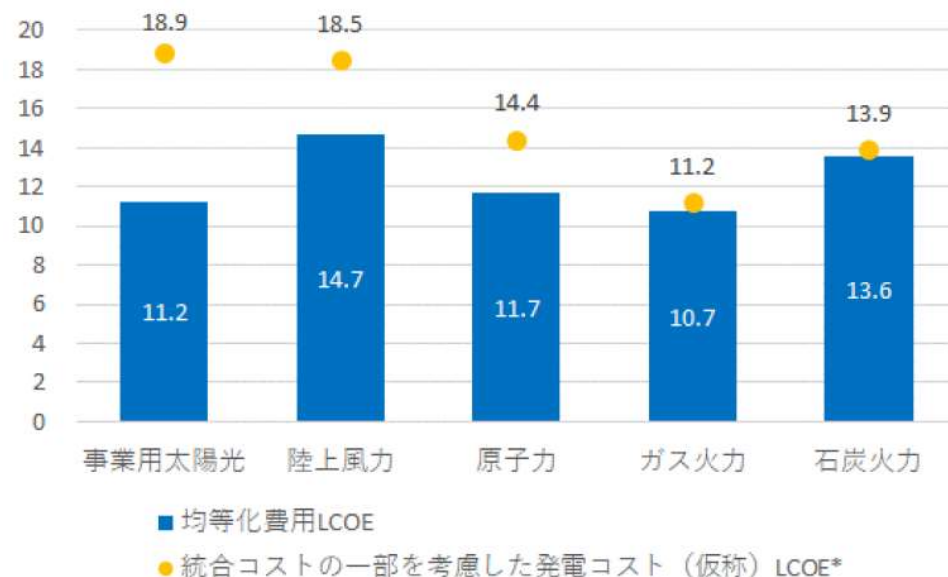


Note: Values at 7% discount rate. Box plots indicate maximum, median and minimum values. The boxes indicate the central 50% of values, i.e. the second and the third quartile.

(出典)OECD/NEA: Projected Costs of Generating Electricity, 2020 Edition (2020)

*LTO(Long-term Operation: 原子力発電の寿命延長)

発電コスト評価 (電力系統への統合コストの考慮)



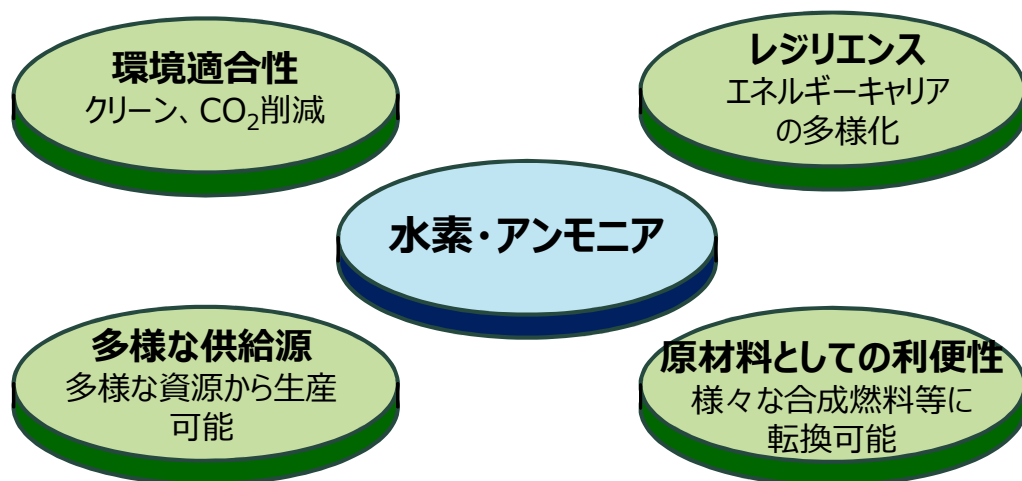
(出典)経済産業省：発電コスト検証について(令和3年8月4日)

<https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/048/048_004.pdf>

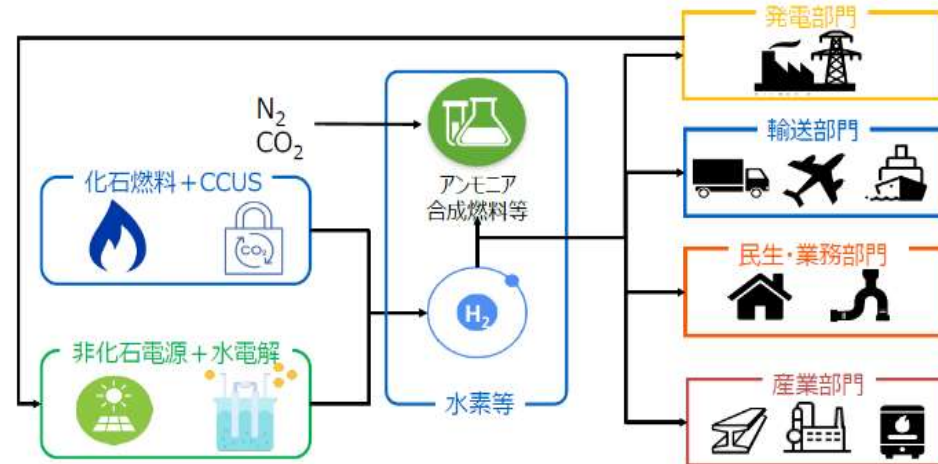
水素・アンモニア

- 水素・アンモニアの価値→環境適合性、レジリエンス、多様な供給源、原材料としての利便性
- H_2 、 NH_3 のCNへの貢献→脱炭素化が困難な分野(Hard-to-Abate Sectors)(鉄鋼、化学工業、船舶、航空等)、発電部門(混焼、専焼)での脱炭素化を目的として、利用の検討が進められている。
- 水素の類型：グレー水素(化石燃料由来、安価)、ブルー水素(化石燃料+CCUS)、グリーン水素(再エネ由来、現在のコストはブルー水素の2～4倍、将来低下の見込みも)、イエロー水素(原子力)
- 水素液化温度は $-253^{\circ}C$ の一方、アンモニアは $-33^{\circ}C$ で液化可能、既存インフラも存在
- 課題は、技術開発、インフラ整備(サプライチェーン整備)、コスト低減

水素・アンモニアの価値



クリーン水素・アンモニア供給と利用用途



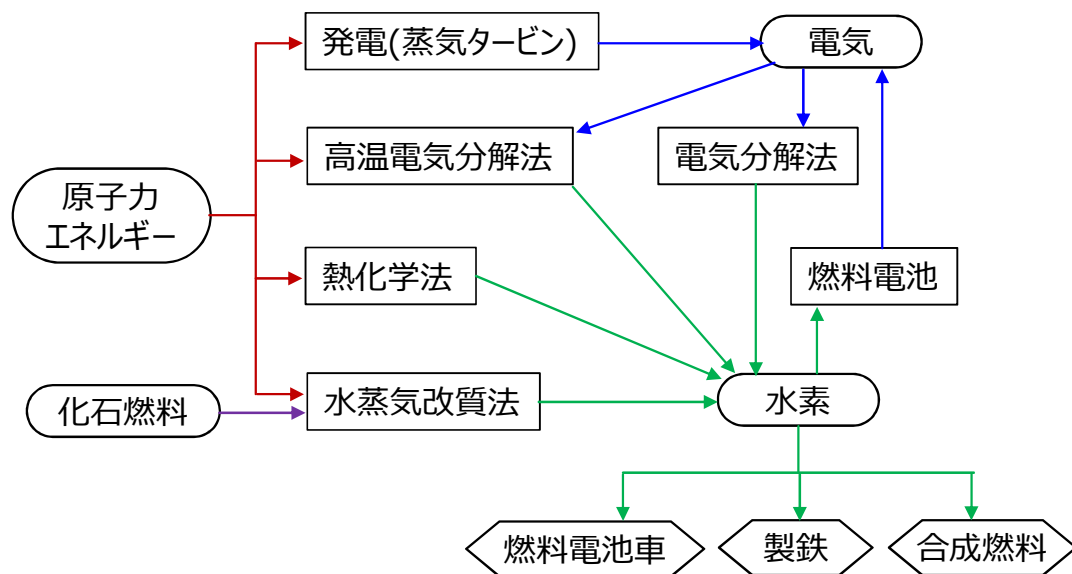
(出所)経済産業省：今後の水素政策の課題と対応の方向性中間整理（案）、2021年

水素エネルギーと原子力

- 水素は脱炭素化が困難な部門(鉄鋼、化学、運輸→“Hard-to-Abate Sector”)や電力部門(水素混焼や専焼)での利用や、水素の国際サプライチェーン構築が検討されている。
 - ・ グレー水素：化石燃料利用、ブルー水素：化石燃料+CCUS、グリーン水素：再エネ+水電気分解
- 多様な技術での原子力エネルギー利用により水素製造が可能(原子力+電気分解→パープル/ピンク水素*)
- 原子力による水素製造は、再エネと共に水素自給率の向上に貢献する技術オプション
- 高温ガス炉→長周期の再エネ出力変動に対して水素製造量の制御を通じて発電量を調整可能

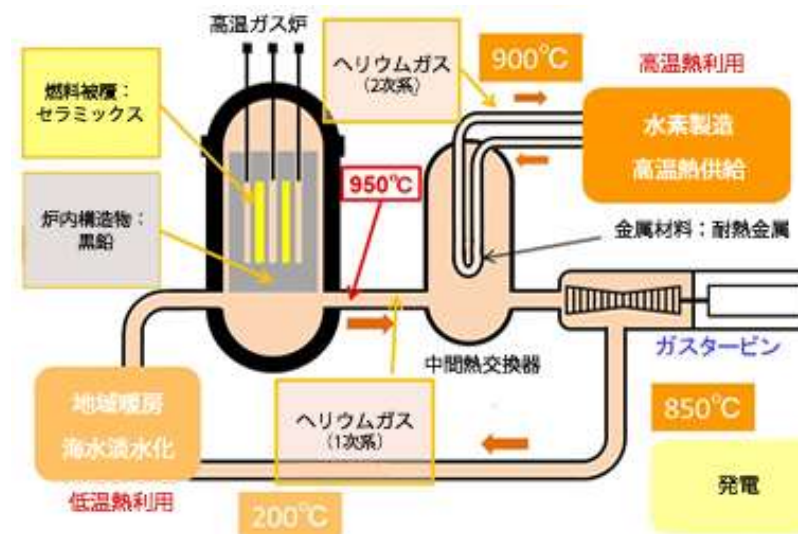
*World Energy Council: National Hydrogen Strategies, September 2021

原子力エネルギーによる水素製造



(出典) IAEA: Hydrogen Production Using Nuclear Energy (2013)
<https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1577_web.pdf>等より作成

高温ガス炉での水素製造イメージ



(出典) 日本原子力研究開発機構
<https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/research/research_03.html>

カーボンニュートラルと原子力エネルギー

- **原子力エネルギー利用のメリット** → **原子力エネルギーは、エネルギー安定供給と地球環境保全に貢献するエネルギー源**
 - **電力・非電力分野の脱炭素化**（ゼロエミッション電力供給、グリーン水素製造、グリーン熱供給等）
 - **エネルギーセキュリティ強化、電力安定供給への貢献**（準国産エネルギー[国内燃料在庫で数年間電力供給可能]→エネルギー自給率向上、国産技術→技術自給率の維持、燃料価格高騰の影響が小さく経済優位性のあるベースロード電源、化石燃料調達の際の価格交渉力の強化[Bargaining power]、慣性力・同期化力や調整力の提供[再エネ主力電源化への貢献]、電力市場の競争の活性化[新電力等への安定した価格での電力供給]、高速炉サイクル開発→国産資源に乏しい国家環境が原点[超長期の原子力利用]、高レベル放射性廃棄物の量・有害度の低減等）
 - **技術イノベーション**(小型モジュール炉[SMR]→高い安全性、工期短縮、投資リスク低減、防災エリア縮小等)
 - **原子力発電の再稼働**(未稼働炉約23百万kW、2022年3月時点)→LNG換算約18百万トンに相当*→国際エネルギー市場の需給緩和、他国のエネルギー調達確保への貢献→原子力再稼働は世界のエネルギー安定供給に貢献*原子力設備利用率80%、LNG発電効率60%時
- **電力自由化と原子力エネルギー**
 - **原子力は電力自由化の下で維持されうるか？**（競争環境での投資リスクの問題）
 - **市場メカニズムと公益、国益の両立**：電力自由化と公益や国益(地球環境問題、エネルギー安全保障)をどのように両立すべきか？
- **原子力エネルギー利用を巡る課題への取組が重要**
 - **社会的信頼の回復**
 - **安全性を大前提とした既設原子力発電の再稼働、安定的運転の継続**
 - **高レベル放射性廃棄物処理・処分に向けた取組**(国民対話など)

高温ガス炉「HTTR」



高速実験炉「常陽」

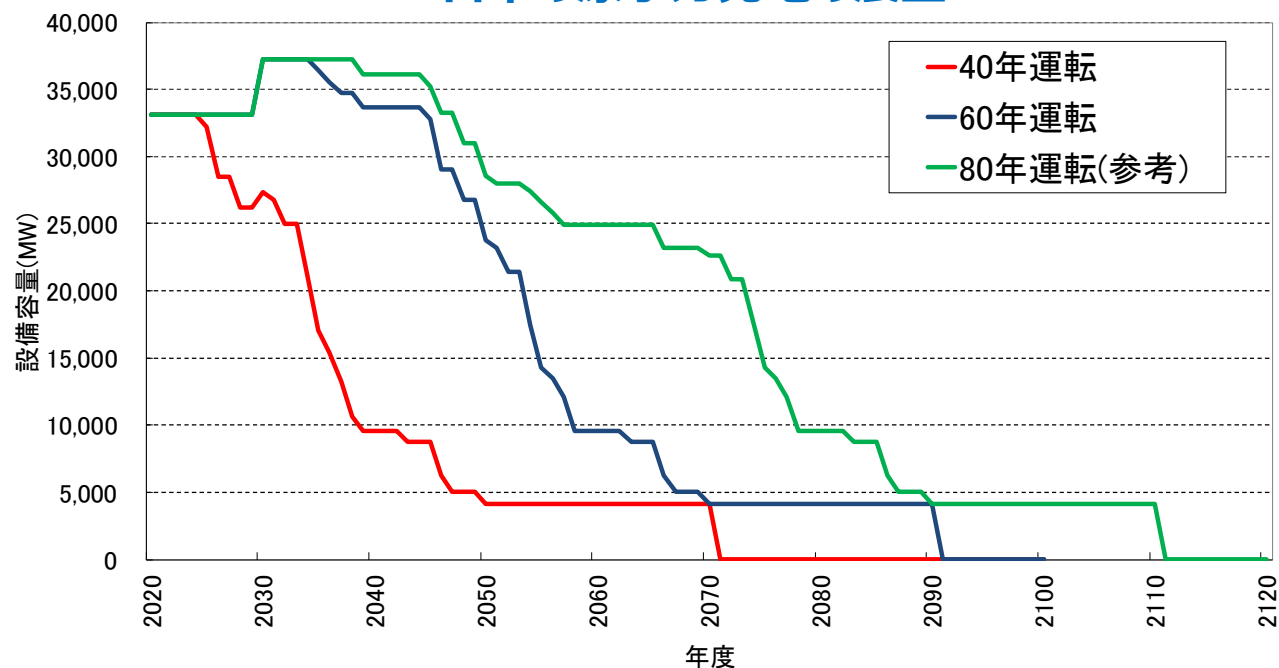


(出所) 日本原子力研究開発機構 (JAEA)
<<https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/joyo/index.html>>
<<https://www.jaea.go.jp/02/press2020/p20060301/>>

原子力発電の展望

- 短期的には、原子力再稼働、効率的運転が重要
- 中長期的には、新增設・リプレイスが重要。原子力の新增設がなければ、将来世代にとって、脱炭素化や資源枯渇問題等エネルギーセキュリティへの対応が極めて困難になると考えられる

日本の原子力発電の展望

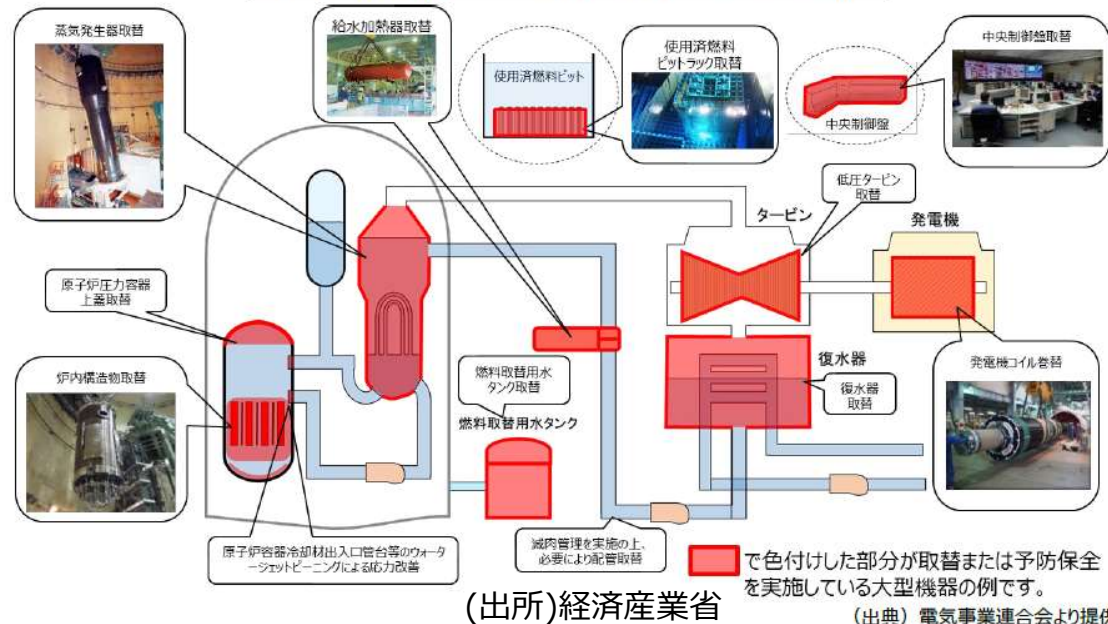


(出所)40年運転、60年運転は経済産業省資料(資源エネルギー庁：2050年カーボンニュートラルの実現に向けた検討(2020年))を参照。
80年運転は仮に稼働中原子炉を全て80年運転可能と仮定した想定値。

運転延長と経年劣化管理

- 運転期間延長の認可を受けた原子力発電所は40年を超える60年運転が可能
- 日常、定期的な点検、保安全管理の他、30年で高経年化技術評価、以降、10年毎にまとまった診断を実施。
- 安全性を確保し、安定的に長期運転を進めるため、事業者は、大型機器の取替等により安全性を向上させる新技術・最新の知見の導入や経年劣化への予防保全、耐震性の向上等を進めている。
- 米国は9割以上のプラントが60年運転認可更新済み、80年運転認可を受けたプラントも存在。多くの国で寿命や耐用年数による運転制限は行っていない。

原子力発電所の大型機器の取替（美浜3号機の例）



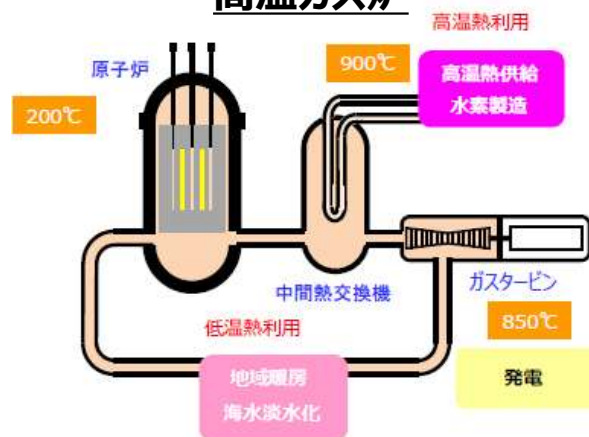
革新炉への期待

- 地震や津波等の自然災害への対策強化、シビアアクシデント対策強化、テロ対策強化、受動的安全性(自然循環による冷却等)、放射性物質排出防止機能、出力調整機能(自然エネルギーとの共存)、ウラン資源の有効利用、放射性廃棄物の有害度低減と減容化、モジュール化(工場生産・工期短縮)など
- 課題：経済性、投資回収の予見性、革新炉の特徴を踏まえた合理的な安全規制・審査(事故、避難)など

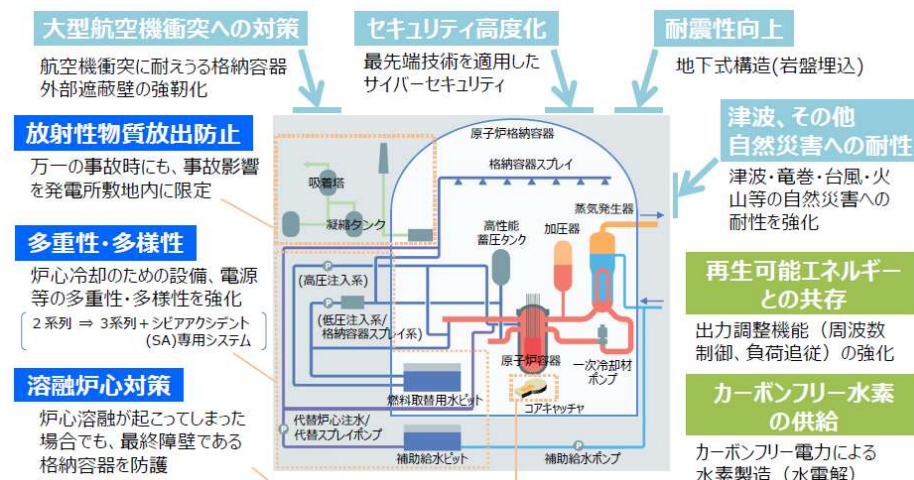
小型軽水炉



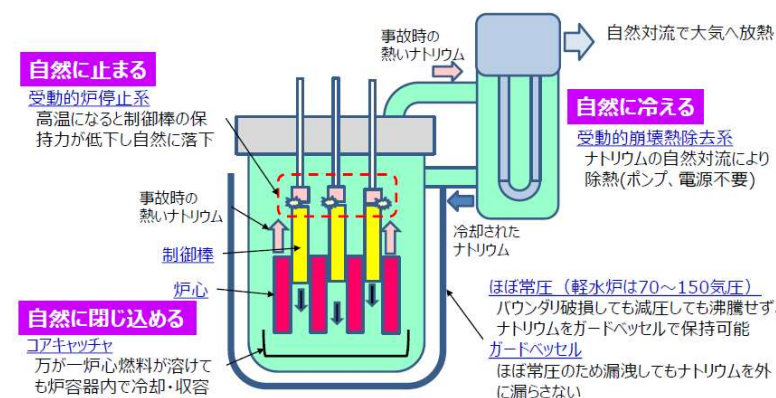
高温ガス炉



革新軽水炉

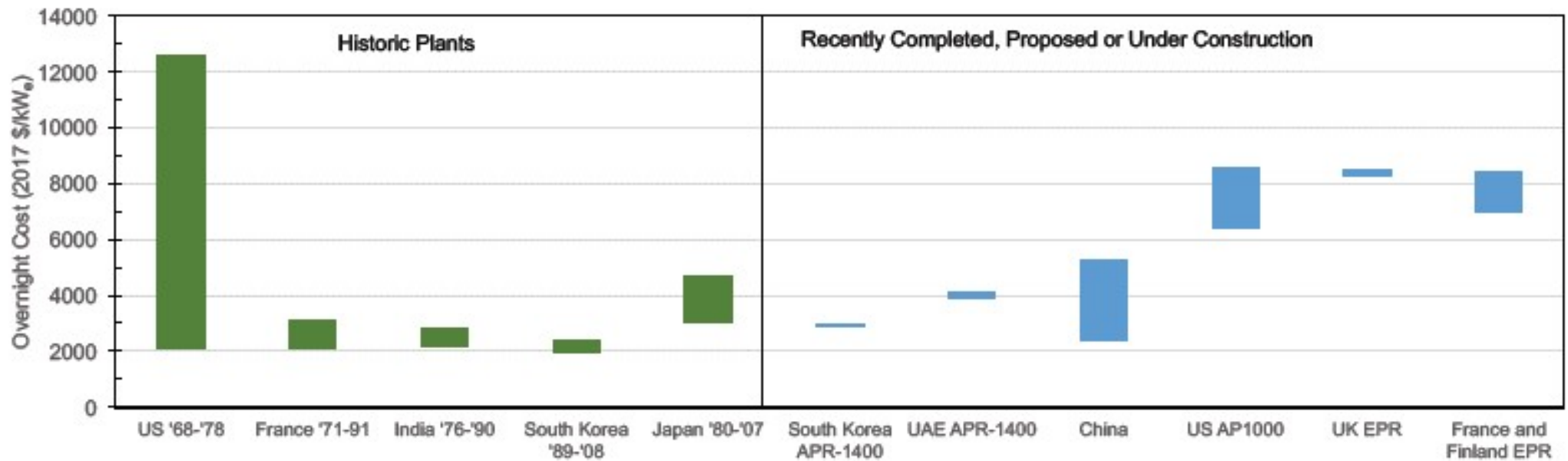


高速炉



(出所)経済産業省:エネルギーを巡る社会動向を踏まえた革新炉開発の価値 (2022)

大型軽水炉の建設コスト(世界)



(出所)MIT:The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World(2018)

小型原子炉(総論)

課題

- 小型炉は基本的に試験開発段階。商用化に向けた着実な実証試験の実施。
- 安全規制、審査体制の整備
 - ・ 高い安全性に見合った合理的な安全規制や審査体制の整備
 - ・ 事業者の期待→安全対策に要する費用の低減、立地地域の受容性の改善
- コストの見通し
 - ・ スケールメリットは期待薄、大型炉よりもコストが高くなる可能性。
 - ・ 一方、高い安全性により安全対策費用が低下する可能性→大型炉とのコスト差縮小、生産拡大による習熟効果によるコスト低減の期待
- 投資回収の予見性の向上(長期収入保証など)
- サプライチェーンの構築(日本は高速炉実験炉“常陽”、原型炉“もんじゅ”、高温ガス炉試験炉HTTRで実績あり)

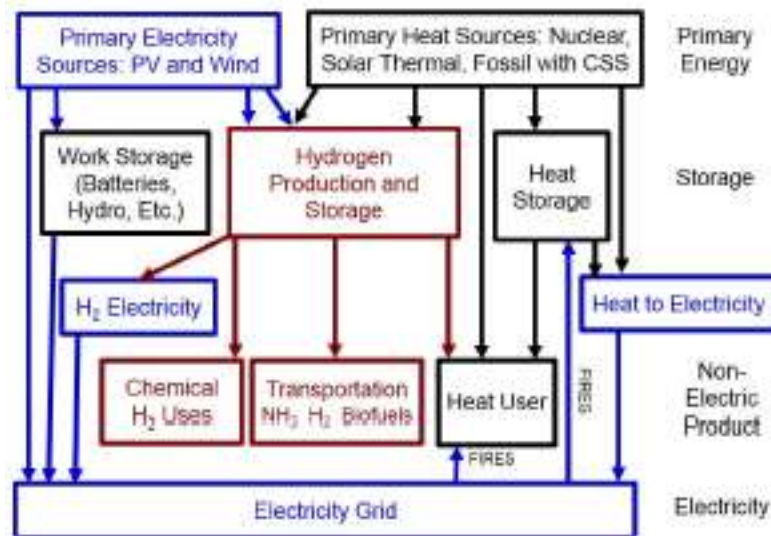
MIT-日本共同研究レポート[†]

“MIT-Japan Study Future of Nuclear Power in a Low-Carbon World: The Need for Dispatchable Energy”(2017年9月)

*MIT、東工大、東京大、JAEA、エネ経研、エネ総工研が参加

➤ 原子力・変動型再エネ(PV、風力)の共存戦略

- 原子力・再エネの柔軟性を高める技術開発(新型炉、熱など多様なキャリアの貯蔵・利用技術)
- 原子力、再エネのベストミックス分析、多様なエネルギーキャリアの生産と部門横断的利用





ADVANCED NUCLEAR POWER PROGRAM

MIT-Japan Study

Future of Nuclear Power in a Low-Carbon World: The Need for Dispatchable Energy

Charles Forsberg, Richard Lester, Nestor Sepulveda, and Geoffrey Haratyk
Massachusetts Institute of Technology, Department of Nuclear Science and Engineering, 77 Massachusetts Ave., Cambridge, MA 02139

Akira Omoto and Tomihiro Taniguchi,
Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, Japan

Ryoichi Komiya and Yasumasa Fujii
The University of Tokyo, Department of Nuclear Engineering and Management, Graduate School of Engineering, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

Kazuaki Matsui
Institute of Applied Energy, Shimbashi SY-Building, 1-14-2, Nishi-Shimbashi, Minato-ku, Tokyo, Japan

Xing, L. Yan
Japan Atomic Energy Agency, 4002, Narita-cho, Ooarai, Higashi-Ibaraki-gun, Ibaraki-ken, Japan

Tomofumi Shibata and Tomoko Murakami
Institute of Energy Economics Japan, Inui-Building, 1-13-1, Kachidoki, Chiyoda-ku, Tokyo, Japan

MIT-ANP-TR-171
September 2017
For Public Distribution

CENTER FOR
ADVANCED NUCLEAR
ENERGY SYSTEMS

(617) 452-2660
canes@mit.edu
mit.edu/canes

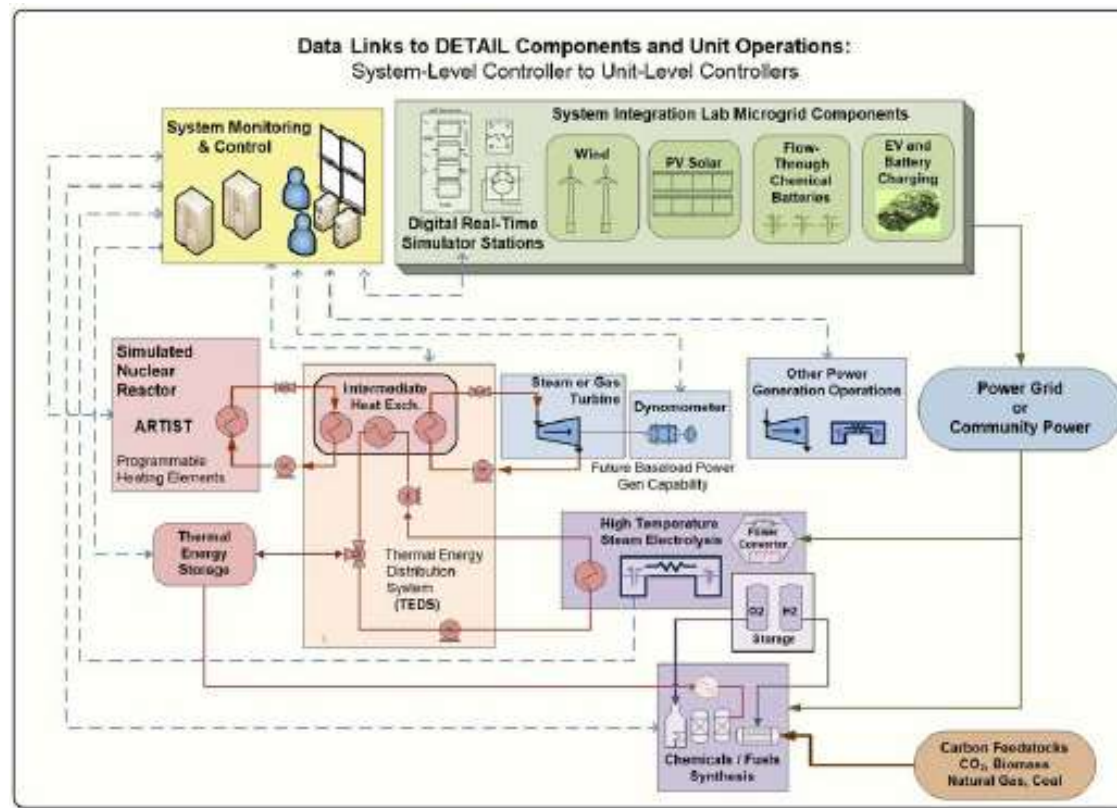
Massachusetts Institute of Technology
77 Massachusetts Avenue, 24-215
Cambridge, MA 02139-4307

CANES

(URL) <http://energy.mit.edu/publication/future-nuclear-power-low-carbon-world-need-dispatchable-energy/>

原子力・再エネ統合制御システム(米国INL)

原子炉熱貯蔵・利用、水素製造(高温水電気分解)、合成燃料製造、需要制御(EV)、バッテリーによる原子力・再エネ共存システム



(Source) IAEA: Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems for Decarbonized Energy Production and Cogeneration, 2019

新型炉研究開発への期待：小型モジュール炉(SMR)

- 小型モジュール炉のエネルギー面での特性 → 負荷追従性、立地の柔軟性、グリーン水素・熱供給など
- 先進技術の研究開発の活性化 → 人材育成の上での重要な課題

持続可能なエネルギーシステムの実現

カーボンニュートラル、レジリエンス強化、エネルギーコスト抑制、再エネ主力電源化、原子力の持続的利用

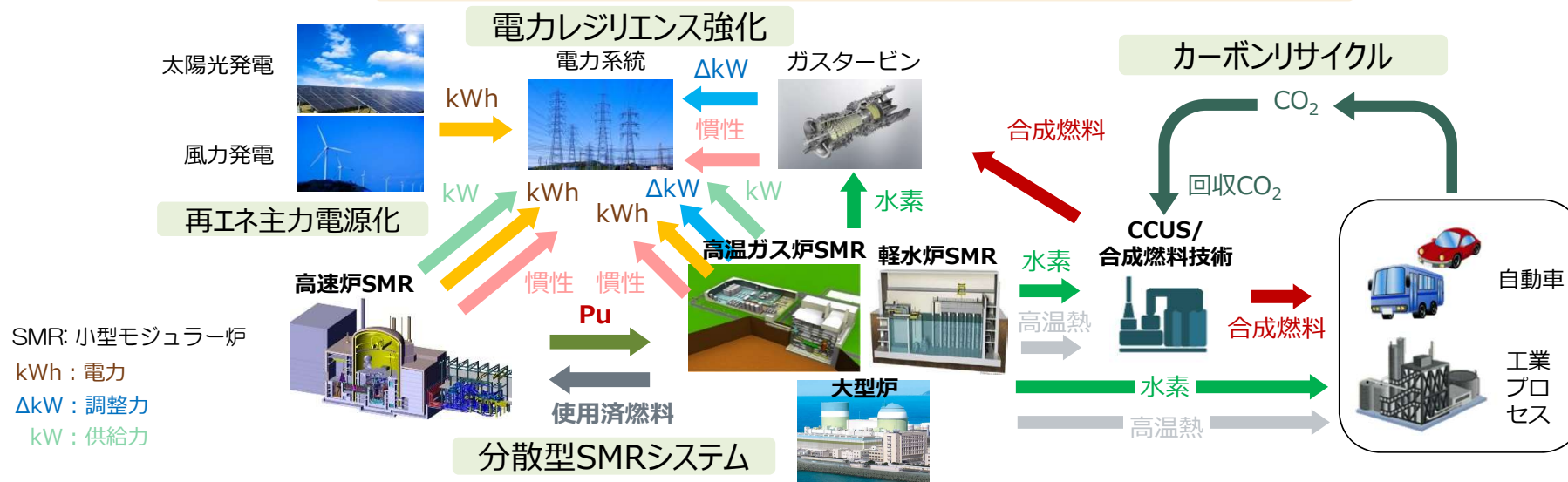
持続可能な開発目標(SDGs)

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS



グリーンエネルギー、レジリエンス、安価なエネルギーサービス、再エネ、イノベーション等

カーボンニュートラル実現、レジリエンス強化、エネルギーコスト抑制

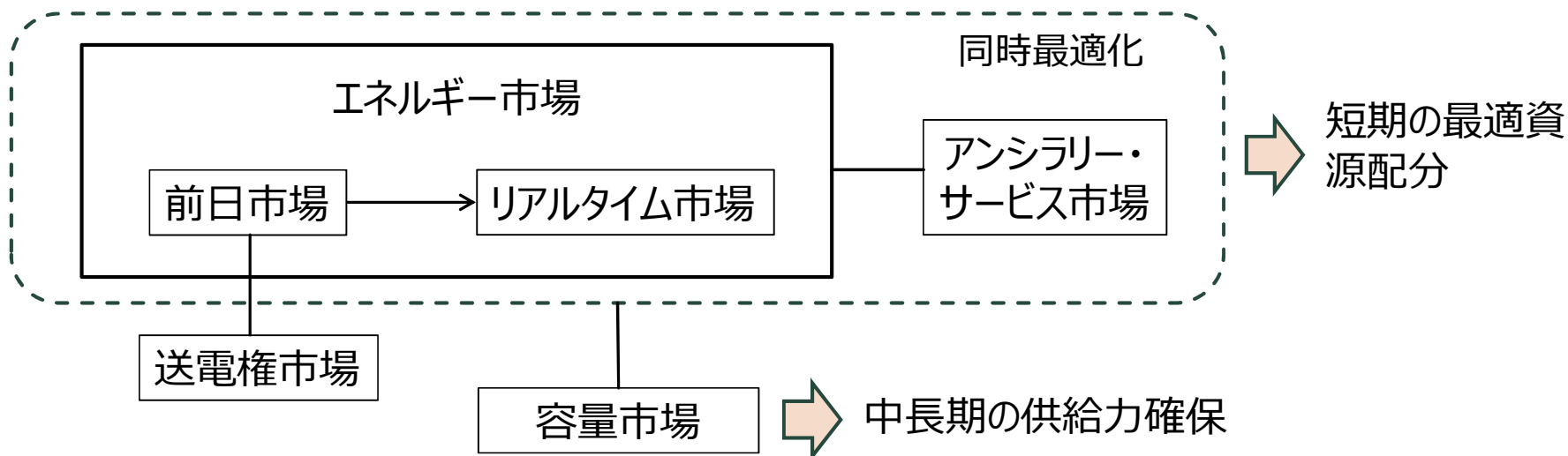


(出典)文部科学省「原子力システム研究開発事業」基盤チーム型「脱炭素化・レジリエンス強化に資する小型モジュール炉を活用したエネルギーシステム」：研究代表 小宮山涼一(東大)、日揮グローバル、三菱重工、原子力機構、日本エネルギー経済研究所(2020年12月～)

電力自由化

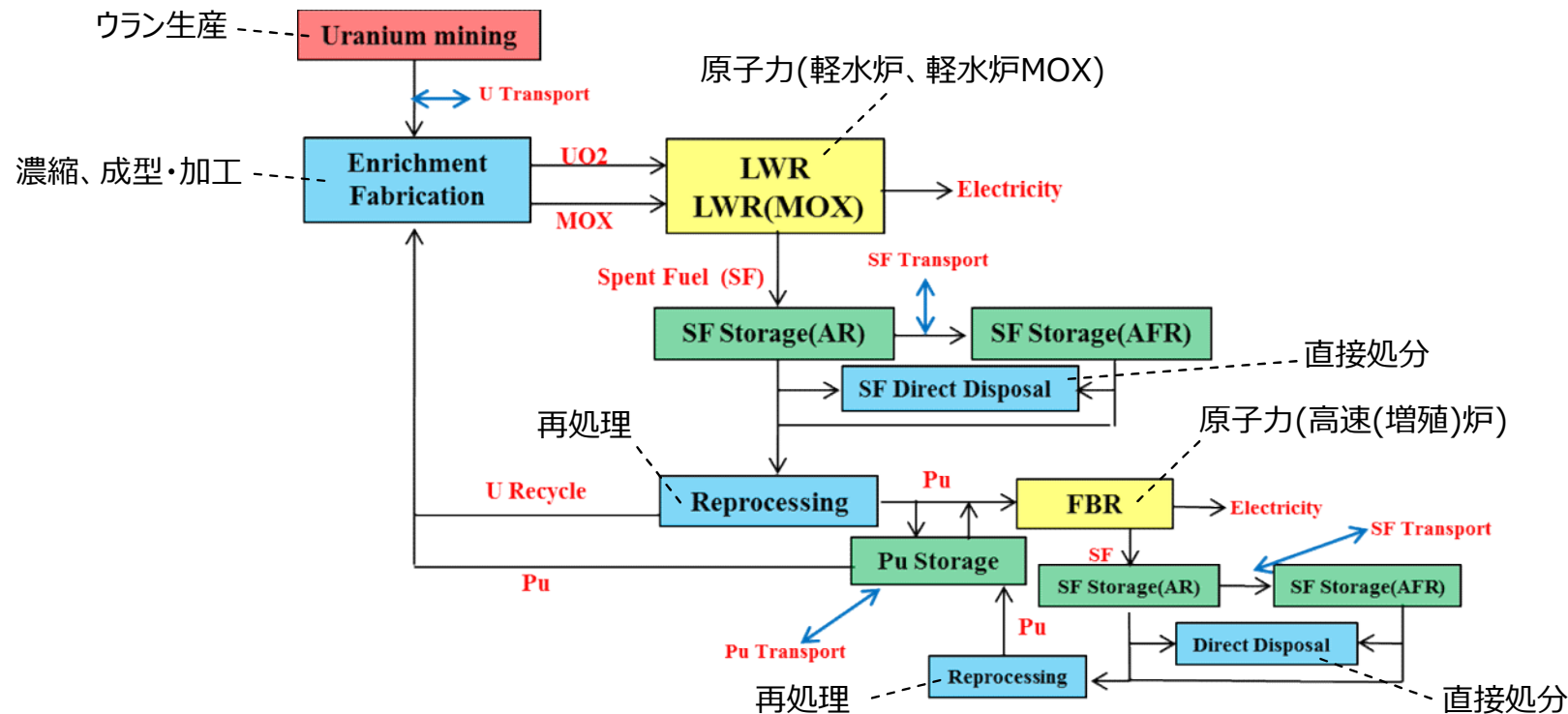
- 電力価格の水準は電力市況により左右され、大きく変動
- 原子力発電は初期投資が大きく、固定費の比率が高いため、投資回収の見込みが立てにくい
→長期の収入保障など、投資の予見性を確保する方策が重要

- ・ 前日(スポット)市場： kWhの取引、時間前市場の価格のヘッジ
- ・ 時間前(リアルタイム)市場： kWhの取引、インバランス清算
- ・ アンシラリーサービス(需給調整)市場： 周波数制御等を行う電源を調達する市場
- ・ (間接)送電権市場： 地点別電力(限界)価格の高騰リスクをヘッジする市場
- ・ 容量市場： kWの取引、中長期の供給力を確保するための市場



高速炉サイクル

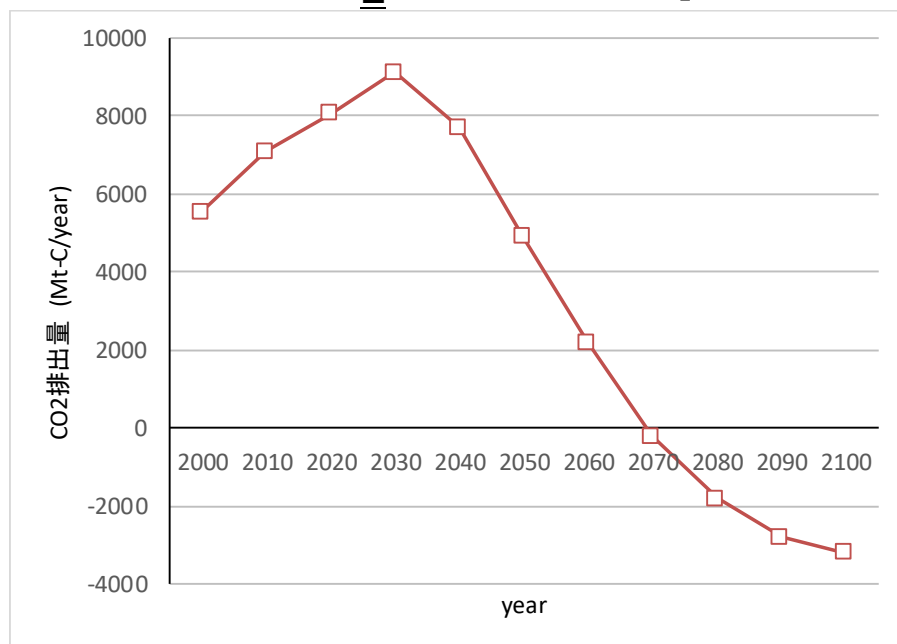
- 放射性廃棄物の減容化、有害度の低減への貢献
- Pu有効利用によるウラン資源の利用率向上→ウラン資源制約の緩和への貢献



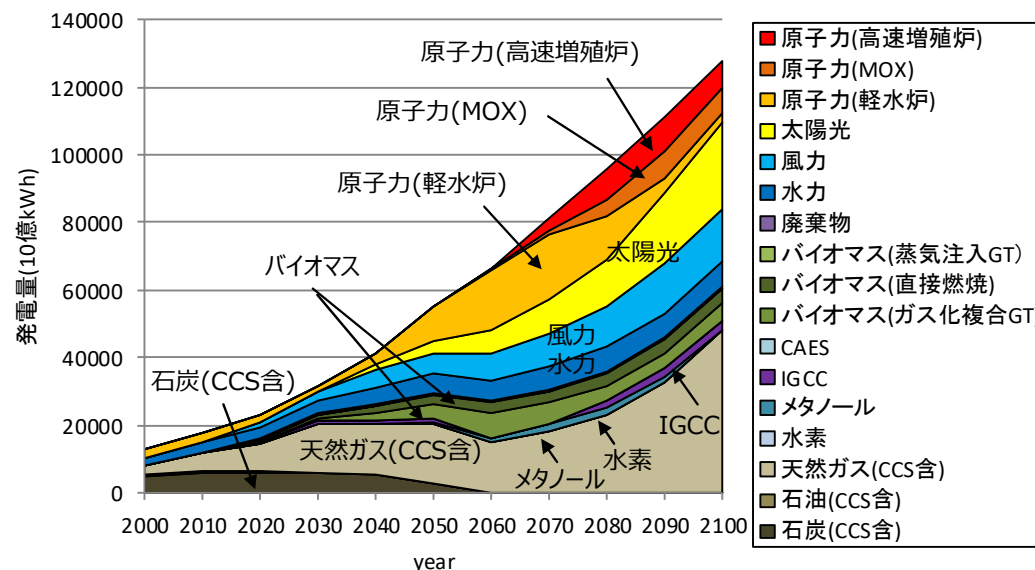
世界のエネルギーベストミックス(1.5℃目標)：高速炉サイクルの役割

- 電源構成→再エネ、原子力、天然ガス(CCS)等が拡大
- 21世紀後半にウラン資源制約の顕在化→高速炉、軽水炉MOXの導入進展
- 高速炉サイクルは原子力エネルギーの持続的利用とカーボンネガティブ実現に貢献

世界のCO₂排出量制約(1.5℃目標)



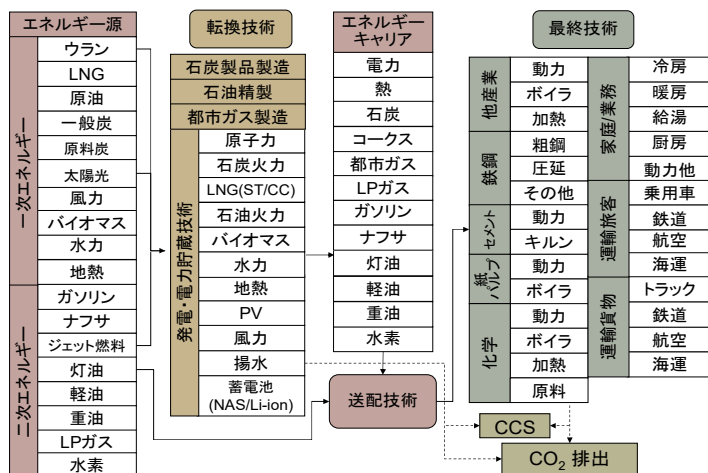
世界の電源構成の展望(発電量)



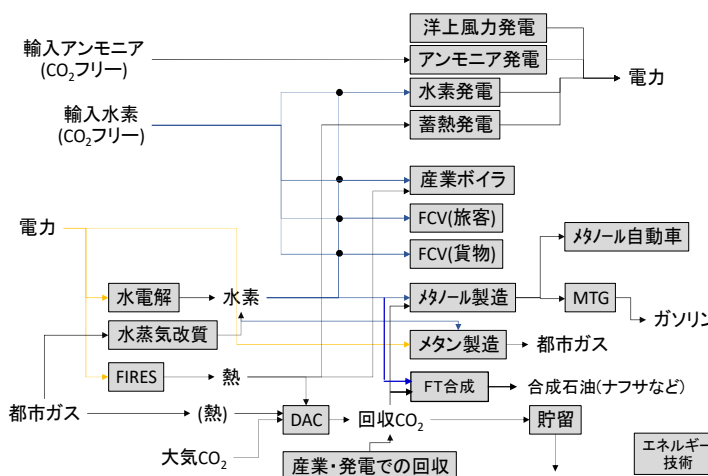
エネルギーシステムの数値シミュレーションモデル

- 日本のエネルギー全体を分析対象に、最適化計算によりCO₂排出制約の下での最適エネルギー需給構造を分析
 - ・ エネルギーシステム全体を評価(一次エネルギー、転換部門、最終消費部門[産業、家庭、業務、旅客、貨物])
 - ・ 電力部門の詳細分析(時間解像度→1時間値、年間8,760時間で分析→再エネ出力変動を詳細に考慮)
- エネルギー供給側(一次/二次エネルギー)と需要側(鉄鋼、セメント、化学、民生、運輸など)を対象に個別技術の積み上げによる分析を行い(技術ボトムアップでの分析)、カーボンニュートラル実現時とそのトランジション(移行過程)でのエネルギー需給構造を統合的に分析
- 革新的技術など300種類以上の技術要素・プロセス等を考慮：次世代自動車(EV、FCV)、エネルギー貯蔵(Li-ion電池、NAS電池、蓄熱装置)、CCUS(大気中CO₂直接回収、メタネーション、FT合成)、エネルギーキャリア(水素、アンモニア、メタノール、合成ガス、合成石油)、発電技術(水素発電、アンモニア発電、洋上風力発電、燃料電池、蓄熱発電)、省エネ技術(ヒートポンプ)など
- ・ (参考：モデルの実績) GAUC(Global Alliance of Universities on Climate：気候変動に関する国際大学アライアンス)イベント(2021年)、ICEE(The International Conference on Electrical Engineering：電気工学国際会議)パネルセッション(2021年)、日本機械学会企画セッション(2021年)など

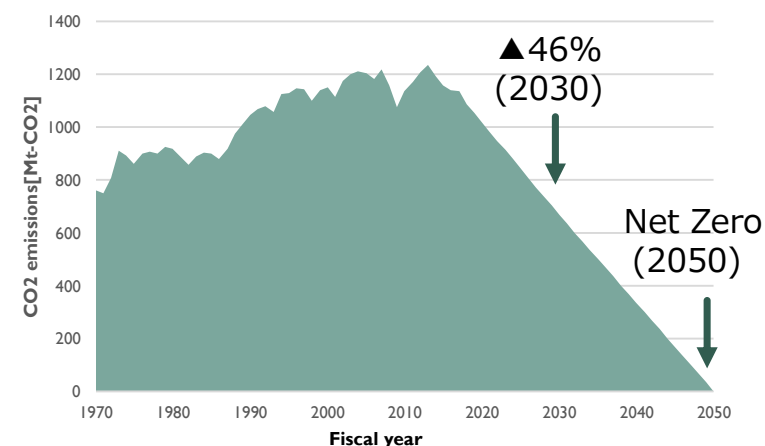
エネルギー技術選択モデル



新技術のモデル化(水素、燃料電池自動車、蓄熱発電、大気中CO₂直接回収、メタネーション、アンモニア、FT合成等)



CO₂排出量制約(2030年：46%削減、2050年：ネットゼロ)



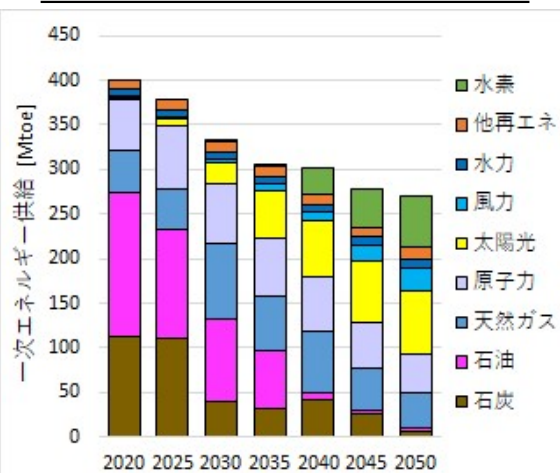
(参考)Kawakami Y, Komiyama R, Fujii Y, IFAC-Papers OnLine 51(28)598-603 (2018), 川上,小宮山,藤井,電気学会論文誌B,138(5), 382-391 (2018)ほか

日本のカーボンニュートラル実現可能性

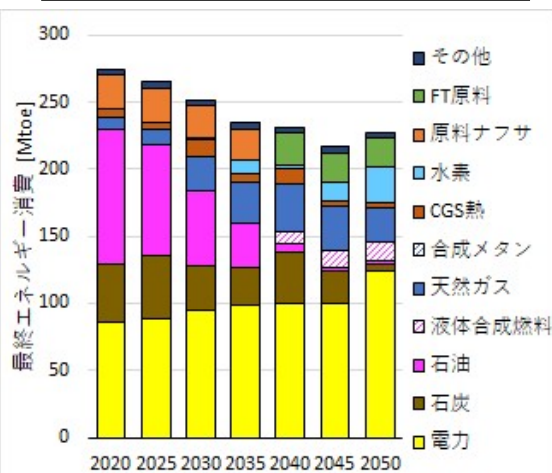
● 主な前提条件

- 風力発電：陸上40GW・洋上90GW上限に新增設可能、水素発電：輸入量年間上限2,000万トン、輸入価格20円/Nm³、太陽光：設備容量上限を設定せず新增設可能、原子力発電：60年運転シナリオ(2050年23.7GW)など
- **省エネルギー推進、電化の進展(需要の電力化)、CCUS技術の展開、CO₂限界削減費用の上昇**
 - 省エネ進展：一次エネルギー供給(2050年→2020年比約3割省エネ)、最終エネルギー消費(2050年→2020年比約2割省エネ)
 - 電化の進展(需要の電力化)：電化率(2020年：約30%→2050年：約50%)
 - 電力脱炭素化：太陽光発電、風力発電の主力電源化
 - CO₂削減：エネルギー起源CO₂排出量(2019年：10.6億トン→2050年：ネットゼロ)
 - CO₂限界削減費用：2030年約2万円/t-CO₂、2050年約8万円/t-CO₂

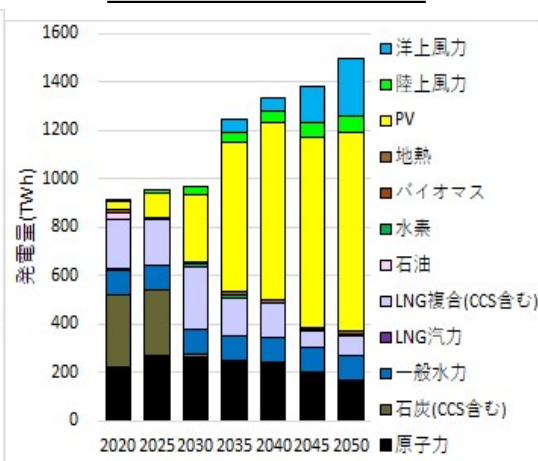
一次エネルギー供給の見通し



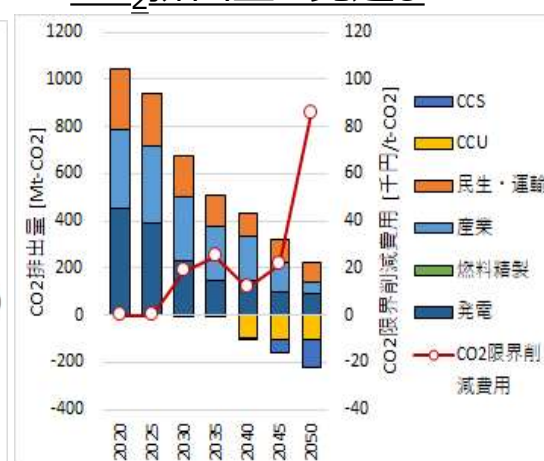
最終エネルギー消費の見通し



電源構成の見通し



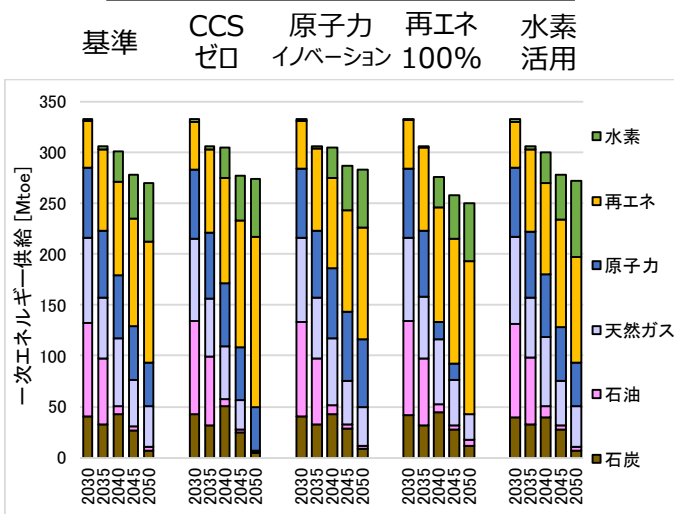
CO₂排出量の見通し



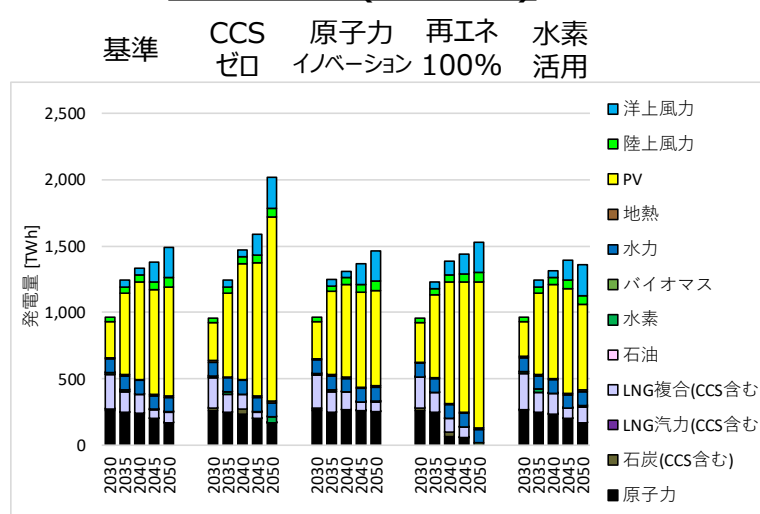
日本のカーボンニュートラル実現可能性(シナリオ分析)

- CCSゼロ：電化による脱炭素化(2050年総発電量：約2兆kWh)、CO₂限界削減費用上昇(14万円/t-CO₂、60%増)
- 原子力イノベーション：建設計画中原子炉(約8.8GW)の新增設可能性を考慮して原子力導入量を最適化(2050年容量上限値32.5GW)、設備利用率向上(90%上限)→原子力は上限値まで導入、CN実現に貢献する経済合理的な選択肢、2050年までの累積システム総コストはシナリオ間で最小 *ただし原子力は社会受容性等の影響を受け、分析結果の解釈には留意が必要
- 再生可能エネルギー100%：2050年エネルギーシステム総コストは原子力イノベシナリオ比で年間約4兆円上昇
- 水素活用：輸入量上限(基準シナリオ比3割増)→燃料脱炭素化の進展により、需要の電化進展の抑制

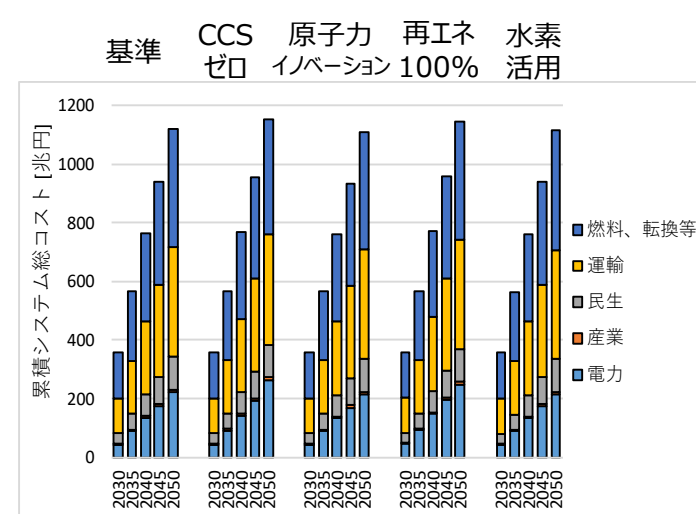
一次エネルギー供給構成



電源構成(発電量)



累積システム総コスト(各年までの累計)



原子力エネルギーの要件

- 安定的で経済性のあるエネルギーの提供
- 社会的信頼を得られる高い安全性
- 放射性廃棄物の着実な処理・処分
- プルトニウム保有量削減への貢献
- 再生可能エネルギーとの共存

日本原子力学会 地球環境問題対応検討・提言分科会 報告書

2022年5月

主査 小宮山涼一、幹事 駒野康男



- フェーズⅠとして、地球環境問題のみならず、エネルギーセキュリティや電力市場の観点より提言をまとめた(2020年9月)
<https://www.aesj.net/uploads/dlm_uploads/saisyu2020Sept.pdf>
- その後、2020年10月に2050年CN実現の政府方針が打出され、2021年10月に第6次エネルギー基本計画が閣議決定され、さらにウクライナ危機を踏まえ現在エネルギーセキュリティに対する関心が高まっている。フェーズⅡとして、CNに向けた動向や技術の調査と原子力の役割・課題等の検討を行い、2050年CNや目指すべきエネルギー政策の在り方への提言をまとめた(2022年5月)
<https://www.aesj.net/uploads/com_agora_gei202206.pdf>

結 語

- **カーボンニュートラル実現には多様な技術の総動員が不可欠**
 - ・ 省エネ、再エネ、原子力、化石燃料の環境調和型利用、CCUSなど
 - ・ それぞれの利点、欠点を補完しうるベストミックスの構築が重要
- **原子力エネルギーはエネルギー安定供給と地球環境保全に貢献しうるエネルギー源**
 - ・ 短期：再稼働、効率運転 中期：革新軽水炉等の新增設・リプレース 長期：高速炉サイクル
 - ・ 原子力発電は電力自由化の下で維持されうるか？→投資回収の予見性確保(長期の収入保障など)
- **科学的なエネルギー政策の検討**
 - ・ 科学的レビューメカニズム：「最新の技術動向と情勢を科学的に把握」、「透明な仕組み・手続の下、各選択肢の開発目標や相対的重点度合いを柔軟に修正・決定」
 - ✓ (例) EBPM (Evidence-Based Policy Making、証拠に基づく政策立案)
 - ・ エネルギー選択の評価軸や科学的指標の確立
 - ✓ S+3E、R(レジリエンス)、技術成熟度、技術自給率、産業競争力、国民負担、…
 - ・ 透明性の高い枠組みによるエネルギー政策の議論が重要