

脱炭素化・レジリエンス強化に資する 分散型小型モジュラー炉を活用した エネルギーシステムの統合シミュレーション手法開発

研究代表者

東京大学
小宮山 涼一

実施機関

代表機関

東京大学

再委託先機関

日本エネルギー経済研究所

再委託先機関

原子力機構

再委託先機関

日揮グローバル

再委託先機関

三菱重工業

ご説明内容

1. 研究の概要
2. 進捗状況
3. 次年度計画

1. 研究の概要

1. 研究の概要 – 背景・目的 –

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

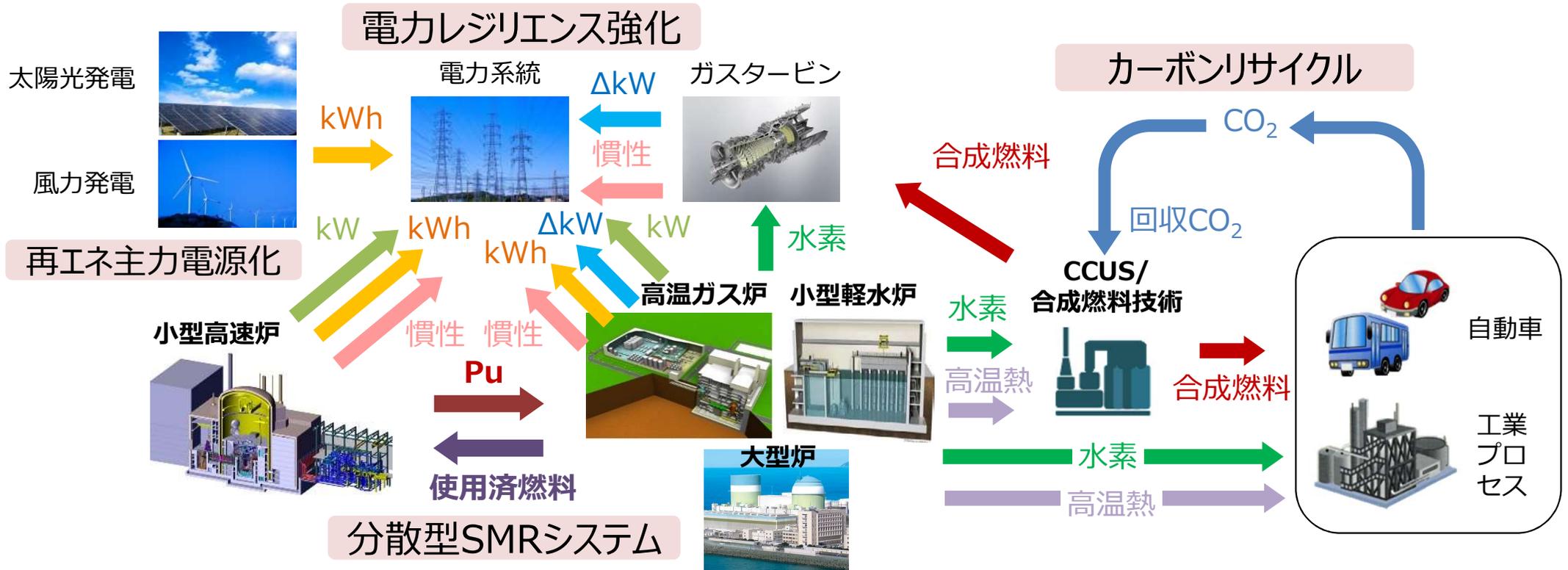
持続可能な開発目標(SDGs)

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS



クリーンエネルギー、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



1. 研究の概要 – 研究目標 –

社会ニーズ・産業界ニーズ

- 2050年カーボンニュートラルの実現
- エネルギーセキュリティ強化(燃料価格高騰等)
- 自然災害に対する強靱化
- 再エネの主力電源化
- 非効率石炭火力のフェードアウト
- 電力・エネルギーシステムの分散化
- エネルギー供給事業への投資の好循環創出



脱炭素化・レジリエンス強化を実現する
エネルギーシステムの将来像

SMRの特長

- 優れた安全性、機動性
- 需要に応じて増設可能
- 標準化・量産化による初期投資の抑制

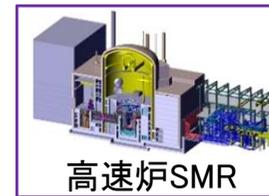
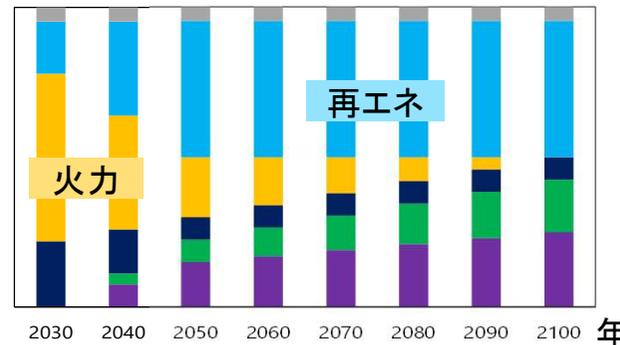
➡ 分散配置に適する



社会ニーズ・産業界ニーズに適合するSMR像

大型炉に加え、SMRの最適導入シナリオを
導出可能な統合シミュレーション手法を
確立し導入可能なSMR概念を構築

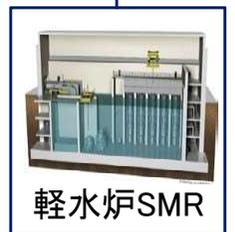
■ 軽水炉SMR ■ 高温ガス炉 ■ 高速炉SMR



高速炉SMR



高温ガス炉

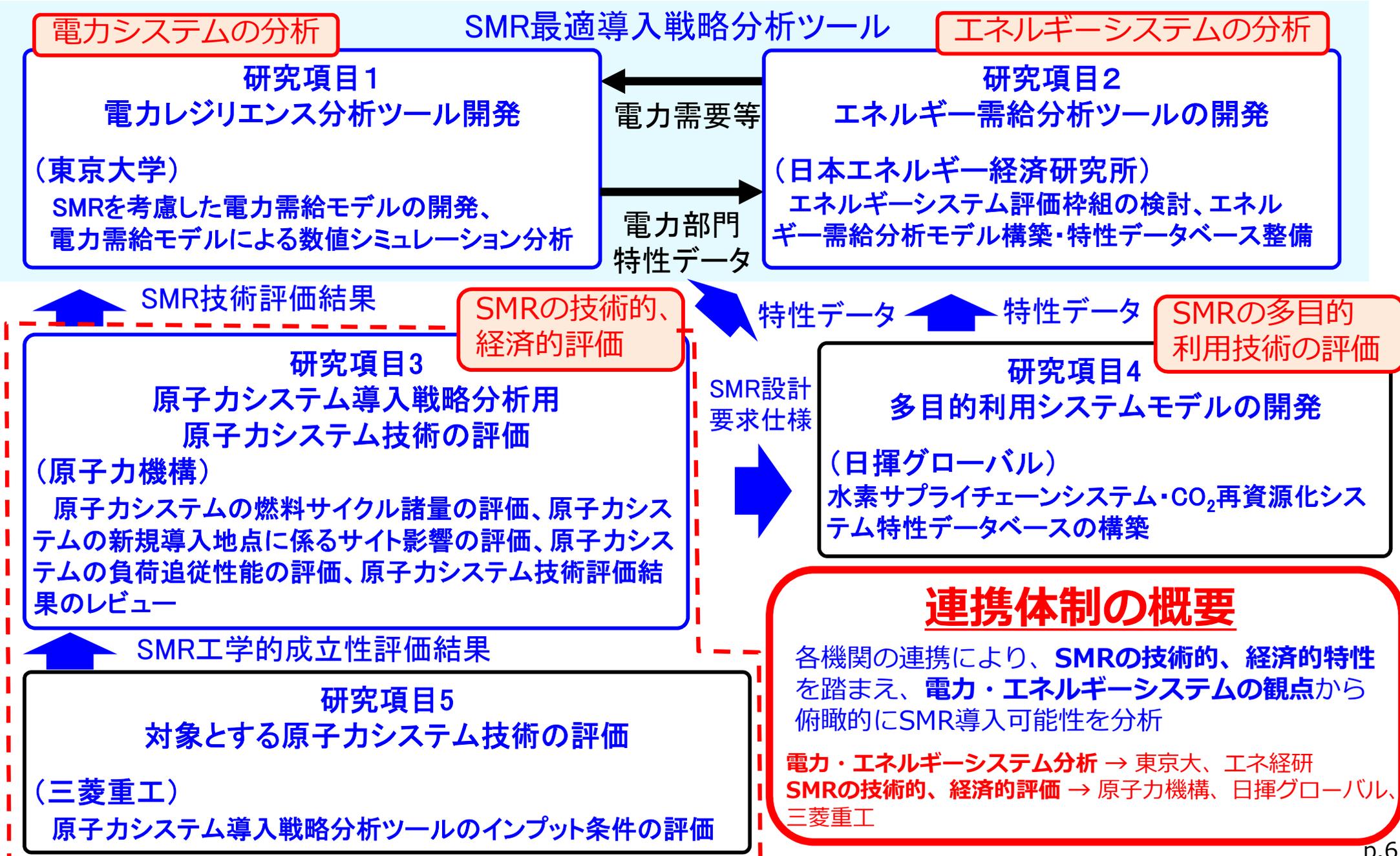


軽水炉SMR

分散型SMRを活用した
エネルギーシステム将来像

1. 研究の概要 – 研究体制 –

期間(予定): 2020年度～2023年度、経費計: 年間3,500万円



2. 進捗状況

電力レジリエンス分析ツールの開発 (1/3)

SMRを考慮した電力需給モデルの開発

目的 SMRのモデル化を検討し、SMRを考慮した詳細な地理的・時間的解像度を有する電力需給モデルを開発する。

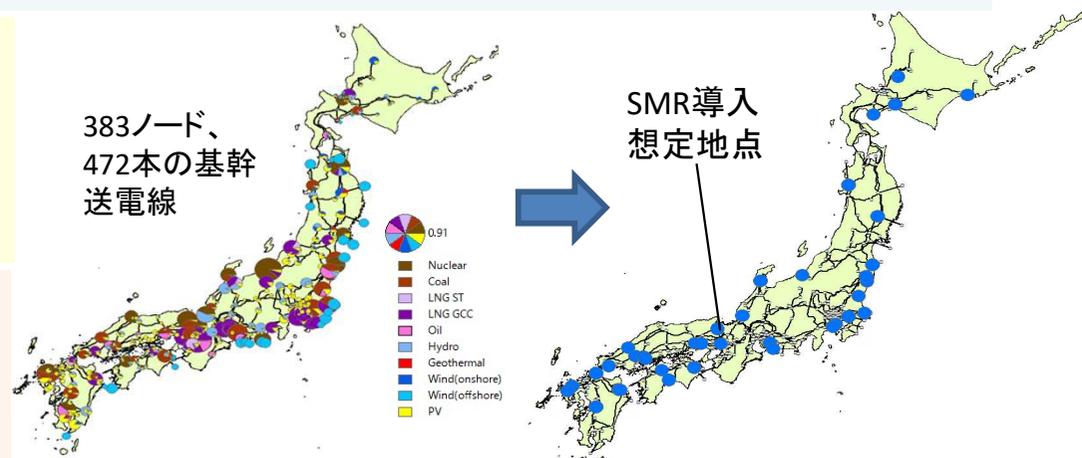
進捗 SMR(小型軽水炉)を想定した、383ノード、472本の基幹送電線から成る年間8,760時間での分析が可能な電力需給モデルを開発した。

■ 電力需給モデルの概要(線形計画モデル)

- 目的関数：電力システム総コスト最小化
- 制約条件：同時同量制約、供給予備力制約、電源負荷追従制約、電源最低出力制約、送電容量制約、電力貯蔵運用制約、SNSP制約、電源作業停止制約、再エネ資源制約など

■ 主な想定

- **原子力設備量**
 - 大型炉：外生(計23.7GW、60年運転での2050年値)
 - 小型炉：最適化で導入量を決定、石炭立地サイト導入を仮定(日本全体で最大29GW [1ユニット5万kW])
 - 原子力発電量(大型+小型)→上限を約2千億kWhで制約
- **SMR技術データ**
 - 建設単価：50万円/kW
 - 技術データ：LNG複合火力と同水準と想定
負荷追従率：44%増/時間、31%減/時間
最低出力：定格出力の30%
- **水素発電、CCS(LNG火力、石炭火力)、洋上風力発電の追加**
- **電力需要**：1兆kWh~1.3兆kWh (←エネ経研より)
- **電力CO₂排出量**：CO₂ゼロで制約(カーボンニュートラル)
- **再エネ**：導入ポテンシャル上限を設定(環境省)、出力変動は気象データベース(AMeDAS等)を基に設定



計算シナリオ設定

		SMR 有無	SMR コスト	水素 価格	再エネ 出力抑制	SMR 負荷追従率
シナリオ1	基準	SMR 有	基準	基準	無	基準
シナリオ2	SMRコスト低下		低下	基準	無	基準
シナリオ3	水素価格低下		基準	低下	無	基準
シナリオ4	SMR+水素価格低下		低下	低下	無	基準
シナリオ5	再エネ出力抑制		基準	基準	有	基準
シナリオ6	SMRコスト低下+再エネ出力抑制		低下	基準	有	基準
シナリオ7	SMR無し	SMR 無	—	基準	無	基準
シナリオ8	SMR無し+水素価格低下	無	—	低下	無	基準
シナリオ9	SMR負荷追従率低下	SMR 有	基準	基準	無	低下

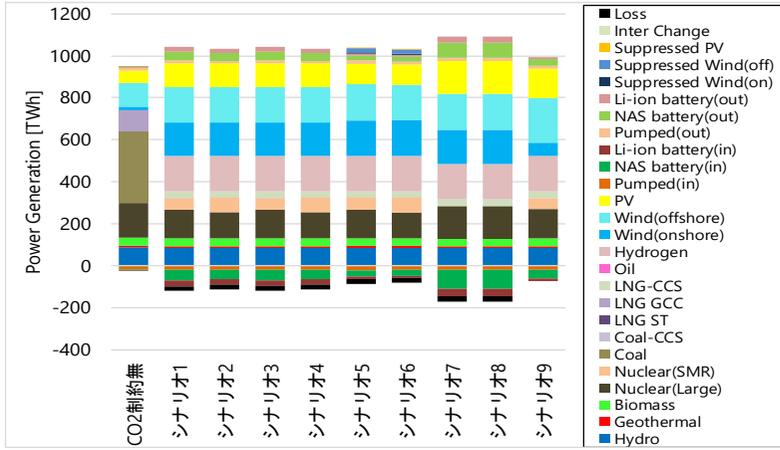
電力レジリエンス分析ツールの開発 (2/3)

SMRを考慮した電力需給モデルの開発

目的 SMRを考慮した電力需給モデルを利用して予備的な数値シミュレーションを行い、電力レジリエンス向上への寄与やSMRの事業上のインセンティブを評価する。

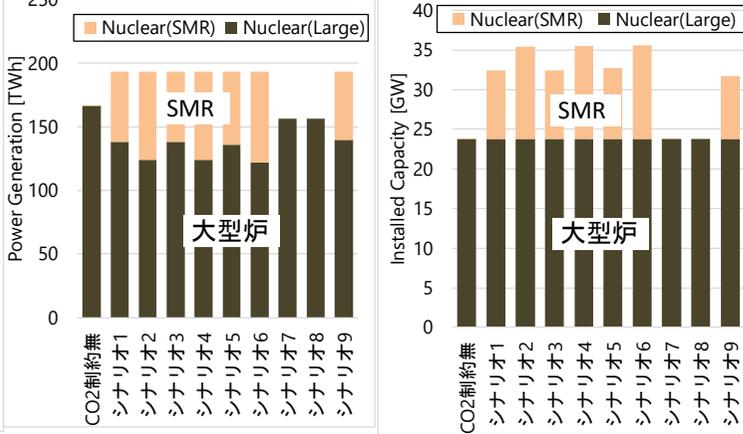
進捗 複数シナリオの下で、電力需給モデルを利用して、再エネ大量導入時のSMR(小型軽水炉)の挙動と事業インセンティブを評価した。

電力需給(発電量) 電力CO2ゼロ制約、再エネ大量導入
→全シナリオでSMR導入、大型炉発電量の減少



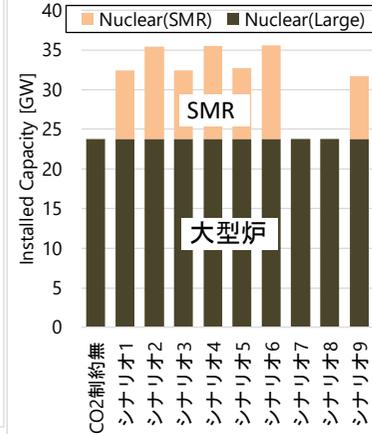
原子力(発電量)

SMR→大型炉に比べ、再エネ大量導入時の経済合理的オプション



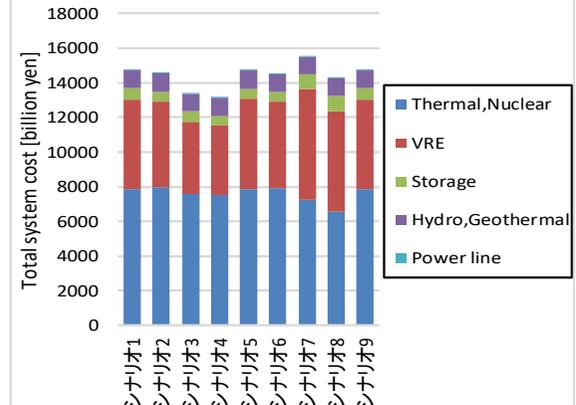
原子力(設備容量)

SMR→大型炉に比べ、再エネ大量導入時の経済合理的オプション



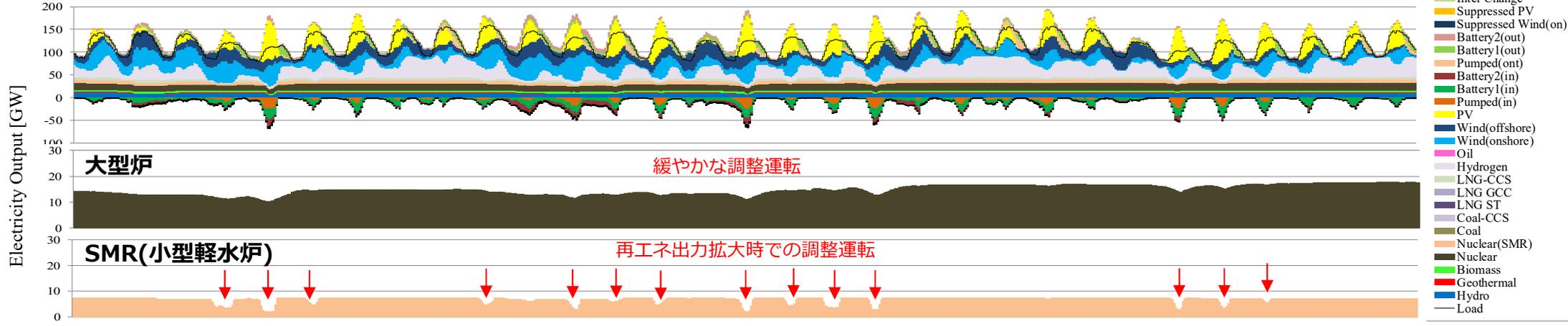
電力システム総コスト

シナリオ7(SMR無)：電力コスト高
→SMR考慮シナリオ1~6：SMR導入により電力コスト抑制



電力需給(シナリオ1、日本全体) 5月(1カ月間、1時間値)

再エネ大量導入時において、SMRの調整運転が需給バランス維持に貢献



電力レジリエンス分析ツールの開発 (3/3)

再エネ大量導入を指向した電力系統でのSMR最適導入量・運用評価

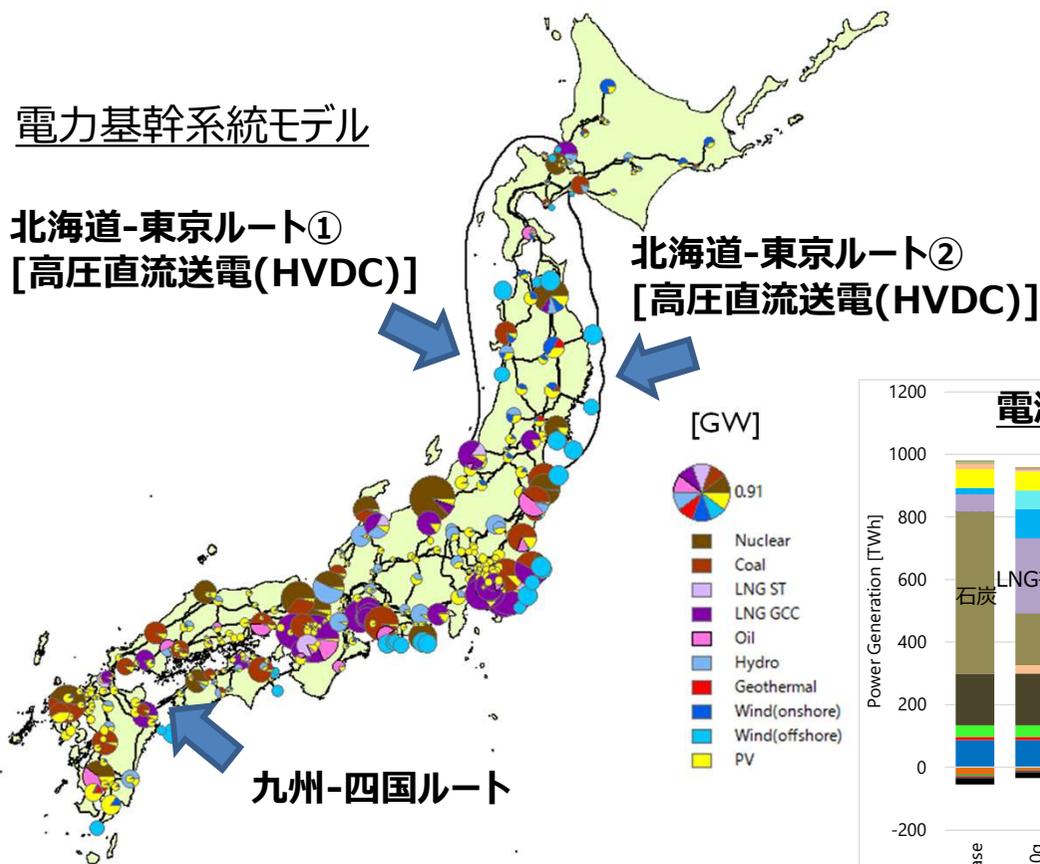
- 電力系統形成→個別電源の要請で建設する「プル型」から再エネポテンシャル等を踏まえて計画する「プッシュ型」へ→**全国大での電力系統の再構築が重要な課題**、新技術への期待→水素・アンモニア、CCUS等
- 新たな電力系統拡張計画(北海道-東京ルート、九州-四国ルート等)を考慮したカーボンニュートラル実現に向けた**電力系統・電源の投資・運用の全体最適評価**

電力基幹系統モデル

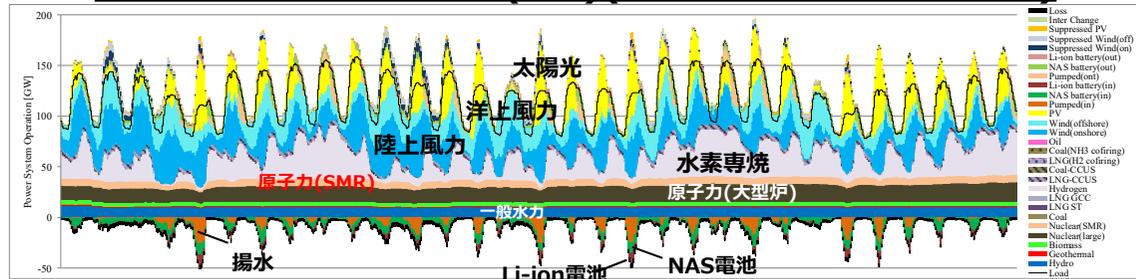
北海道-東京ルート①
[高圧直流送電(HVDC)]

北海道-東京ルート②
[高圧直流送電(HVDC)]

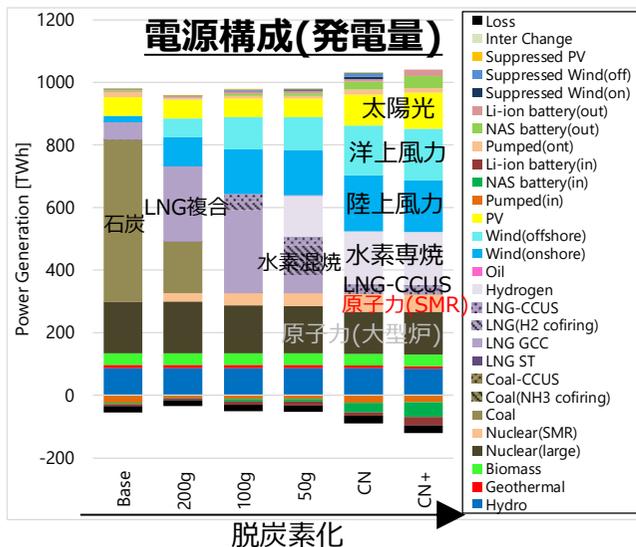
九州-四国ルート



日本全体の電力需給運用(5月)(カーボンニュートラルシナリオ)



電源構成(発電量)



電力価格(電力限界価格)の評価

カーボンニュートラル→電力価格は3倍以上に上昇、価格変動も増大

[yen/kWh]	Ave.	S.D.	Max	Min
Base	6.4	8.2	99.4	2.2
200g-CO ₂ /kWh	10.5	8.7	122.7	4.2
100g-CO ₂ /kWh	15.5	9.2	141.0	2.9
50g-CO ₂ /kWh	15.9	9.0	138.3	2.6
CN	21.2	10.9	163.6	0.0
CN+	23.6	14.2	134.8	▲270.1

脱炭素化 ↓

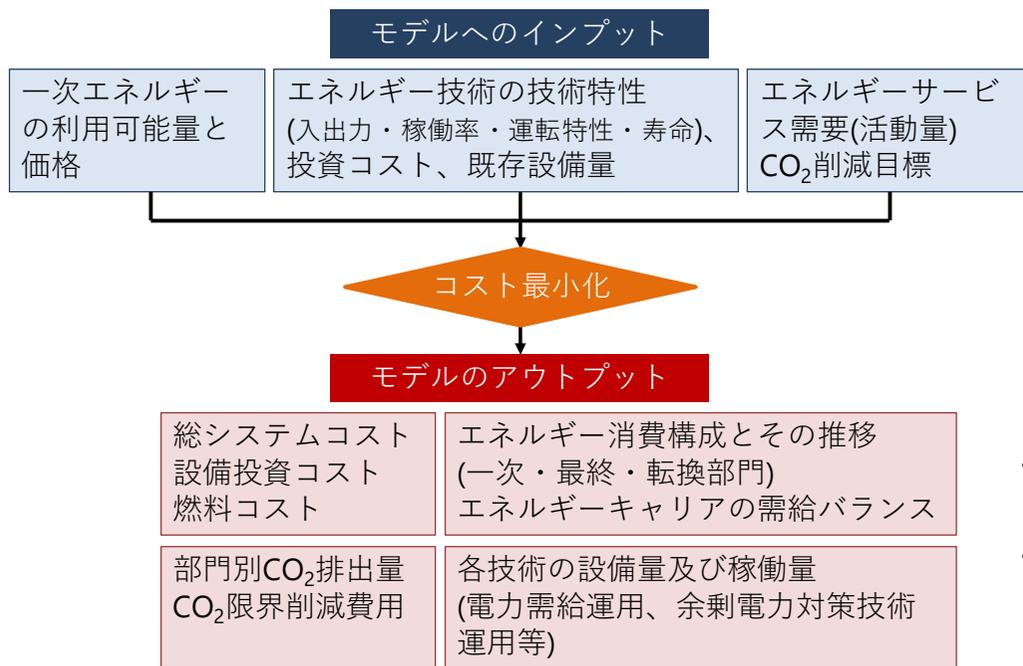
エネルギー需給分析ツールの開発（1/3）

目的 CO₂排出量削減等最新の状況のもとで、エネルギー安定供給性の最大化・システム統合コストの最小化を踏まえてエネルギー需給構成を導出するツールを開発する。

進捗 文献調査結果を踏まえてモデル構築及びデータベースの整備を進め、エネルギー基本計画などの最新動向をも踏まえた上で、エネルギーシステムの中でのSMRの挙動を評価し、モデル・データベースの有効性を確認した。

政策への貢献 総合資源エネルギー調査会・基本政策分科会第44回会合（6/30）において、本研究で構築しているモデルの暫定分析結果を公表し、**2050年を対象としたエネルギーミックスの検討に係る議論に本質的に貢献**した。

モデルの構造



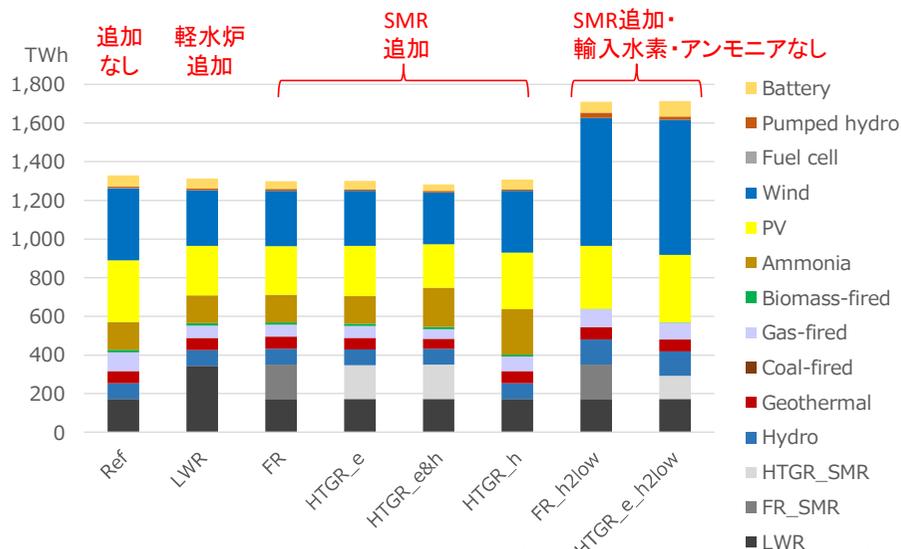
計算ケース設定

ケース名	CO ₂ 削減率 2050年	追加導入原子炉タイプ /運転パターン	輸入水素・輸入アンモニア 利用可能量上限
Ref	▲100%	追加無し	合計50Mtoe
LWR		軽水炉	
FR		高速炉SMR	
HTGR_e		高温ガス炉SMR/電力	
HTGR_e&h		高温ガス炉SMR/電力水素併産	
HTGR_h		高温ガス炉SMR/水素	
FR_h2low		高速炉SMR	0Mtoe
HTGR_e_h2low		高温ガス炉SMR/電力	

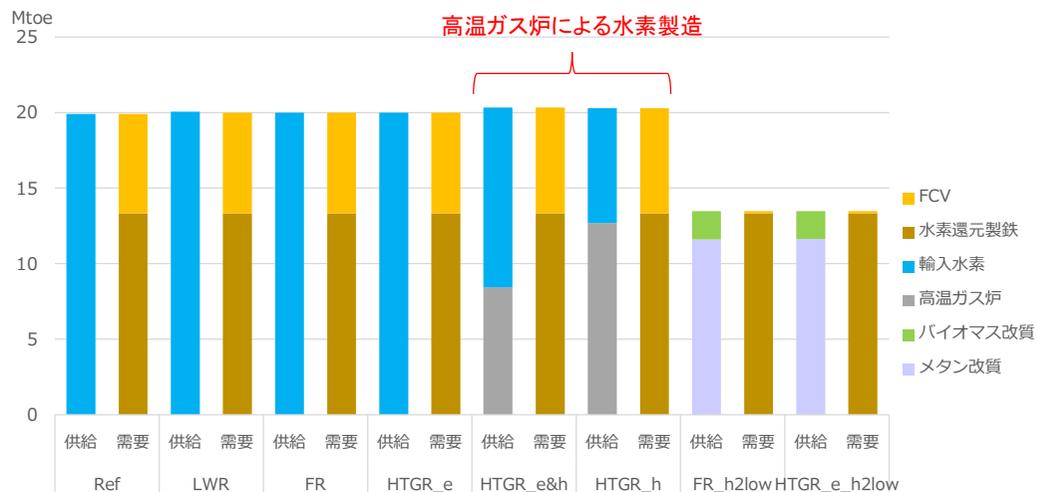
- ・日本全国を5地域に分割、輸出入や地域間連系も考慮したエネルギー需給全体を対象とした技術評価を行うモデル。
- ・電力需要及び再生可能エネルギーの出力変動は1時間刻みでモデル化、更にカーボンリサイクル・水素・大気直接吸収などの新技術やセクター間カップリングなどを考慮。

エネルギー需給分析ツールの開発（2/3）

発電量構成

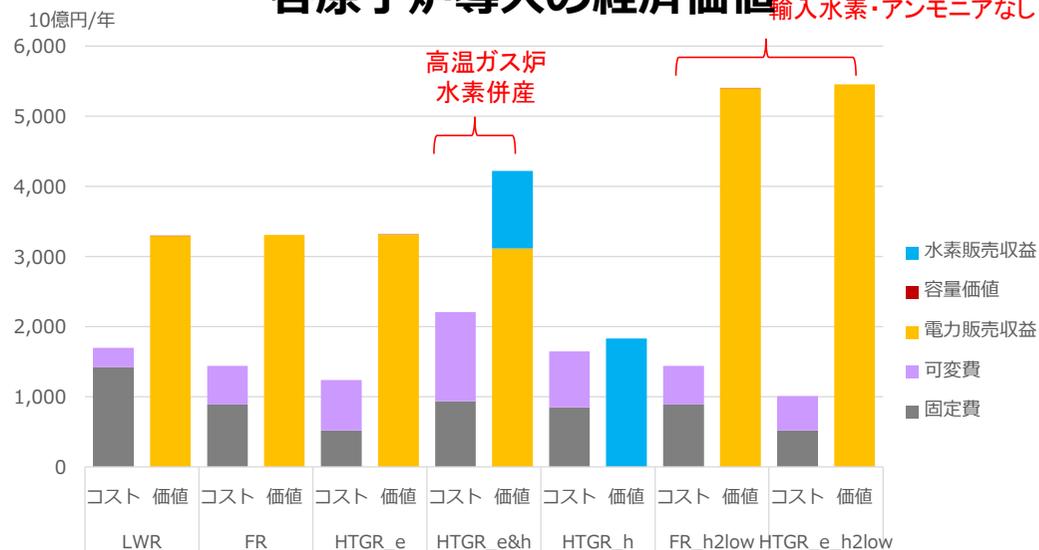


水素バランス



- 高速炉SMR・高温ガス炉SMR及び軽水炉を対象とし、ゼロ・エミッション達成時の各原子炉の導入による便益や、電力・水素の需給バランスを評価。
- この条件下では、最適解において各原子炉は固有の経済的価値をもち、上限までの導入が進む。逆に原子炉の導入が抑制される場合にはコストの上昇を招く。
- 特に、変動性再生可能エネルギー比率が極めて高くなる状況下では、気象条件により電力価格が急騰する時期が発生し、原子力の経済的価値が大幅に上昇する。
- 中でも、水素を併産する場合に経済的価値が高くなる。また、出力調整が可能なSMRの導入は蓄電池の必要量を低下させ得る可能性がある。
- 今後、異なる条件で評価を行うことにより、SMRの挙動とその経済性についてより深い洞察を得ることを目指す。

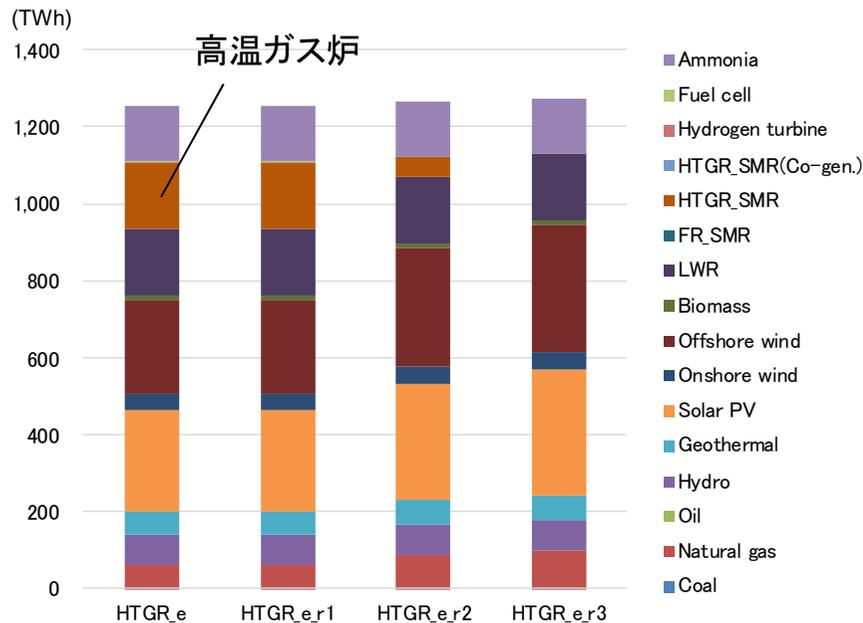
各原子炉導入の経済的価値



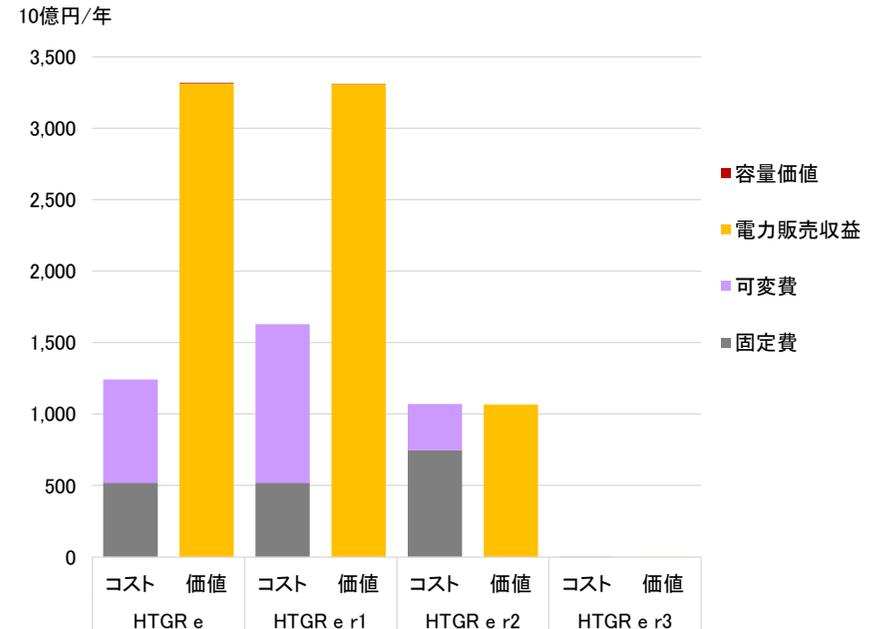
エネルギー需給分析ツールの開発（3/3）

- 前述の「HTGR_e」シナリオを基準として、高温ガス炉のコストが想定より高くなった場合の電源構成や経済価値に対する影響を検討した。検討対象としたケースは以下の通り：
 1. スケール効果を十分に享受できなかった場合（HTGR_e_r1）
 2. 従来型炉と同等の建設、運転維持費が発生した場合（HTGR_e_r2）
 3. 米国で大幅な建設遅延が生じているボーグル3,4号機と同等の建設費がかかり、かつ社会的費用も発電コストに算入する場合（HTGR_e_r3）
- 下左図の通り、コストが増加するほどHTGRの発電量は減り、HTGR_e_r3では導入量がゼロとなる。ボーグル3,4号機ほどのコスト増が生じれば、高温ガス炉の経済的競争力が失われることを示唆している。
- 各ケースにおける高温ガス炉の経済価値は下右図の通り。HTGR_e_r2ではコストと価値がほぼ拮抗し、追加的に設備を建設するメリットが失われることになる。導入量がゼロのHTGR_e_r3では両者ともゼロになる。

発電量構成



高温ガス炉の経済価値



原子力システム導入戦略分析用原子力システム技術の評価 (1/3)

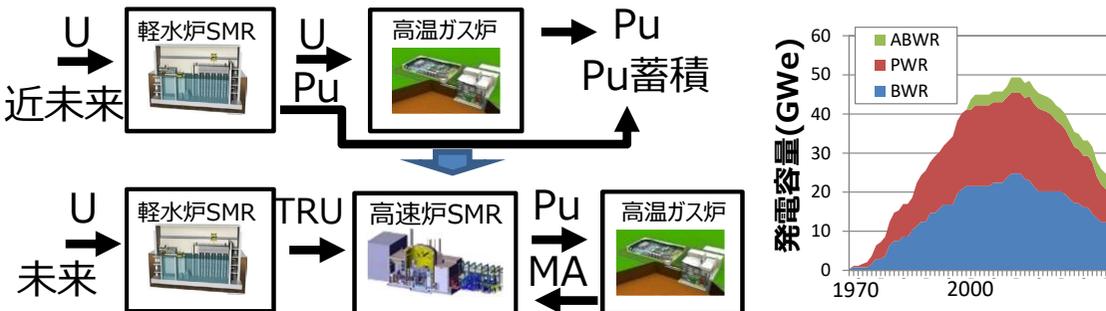
燃料サイクル諸量の評価

目的 核燃料需給バランス及び使用済燃料の諸量を示す。

進捗 今年度、各炉型導入過程検討のための過渡評価システム完成を予定。

過渡評価システムの整備*

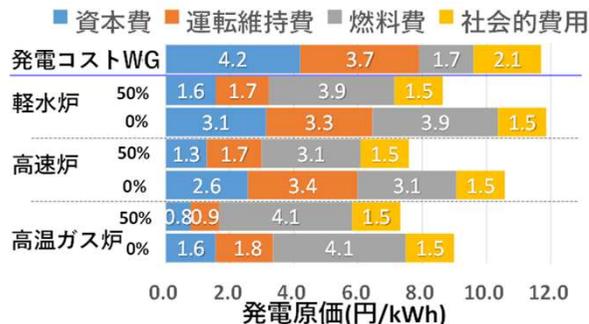
今後、時系列で核燃料需給バランスが成立するシナリオの提示が可能に（※シナリオ検討は来年度以降）



核燃料需給バランスの評価

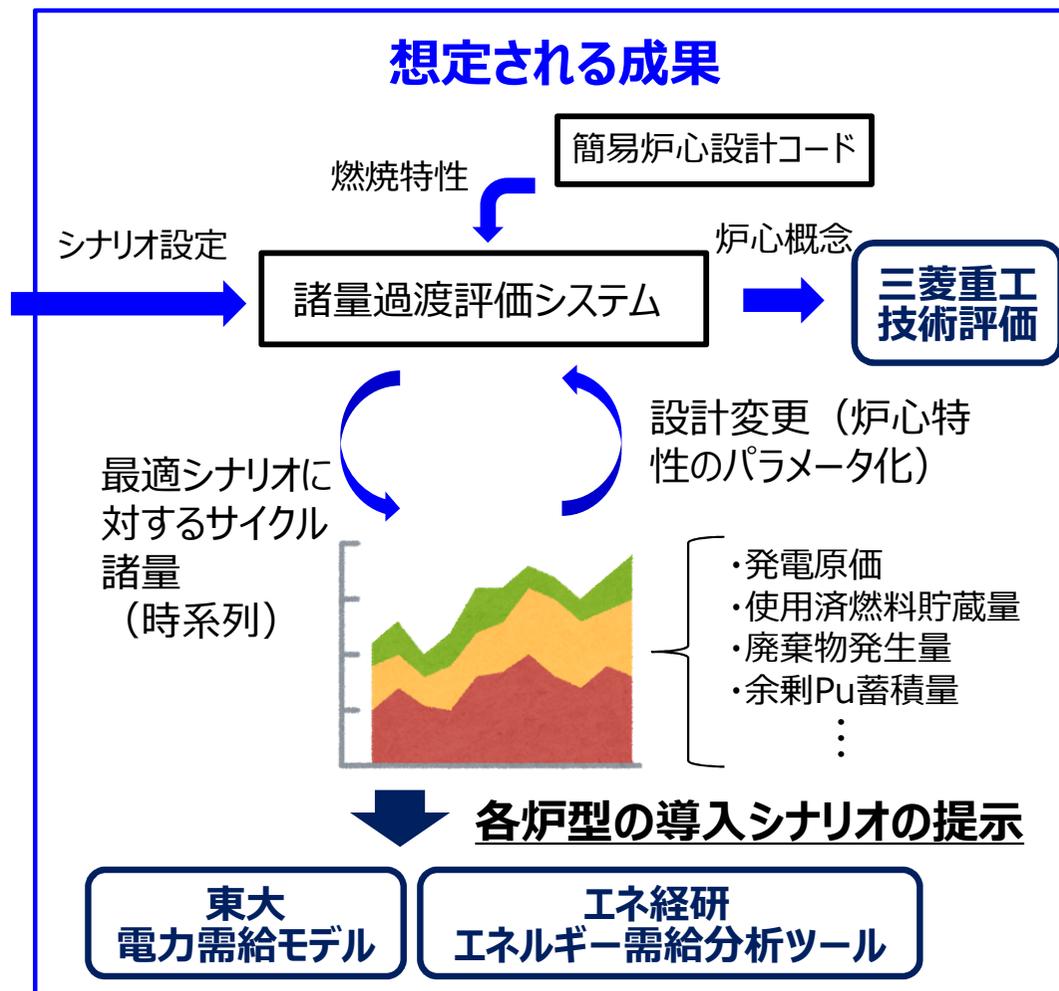
発電原価の評価*

(分散型SMR発電原価の感度解析)



*1) 2021年発電コスト検証WGモデルのプログラム化
 *2) 感度の最も高かった建設コスト削減率に関し提示。浮体式免振技術、3Dプリンティングなどの革新技術により、建設費半減の見込みあり。

想定される成果



原子力システム導入戦略分析用原子力システム技術の評価 (2/3)

新規導入地点に係るサイト影響の評価

目的 立地条件に依存しない浮体式建屋の実現性を示す。

進捗 昨年度モデルを作成、今年度複数の観測地震波を用いた安定性評価を実施。

東大 電力需給モデル

↓ SMR立地候補

◆ 原子力発電所近傍の観測地震波

✓ 強固な地盤をもつ原子力立地地域

◆ 火力発電所近傍の観測地震波

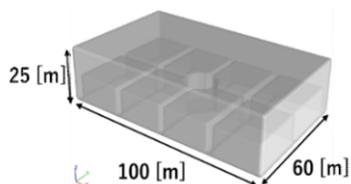
✓ 石炭火力の代替地を想定

◆ ガス備蓄基地や化学プラント近傍の観測地震波

✓ 原子力による水素・燃料供給を想定

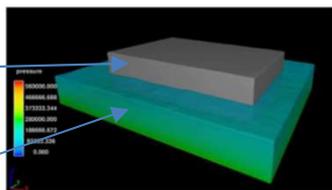
地震応答解析
+
安定性評価

解析モデル



建屋

プール水

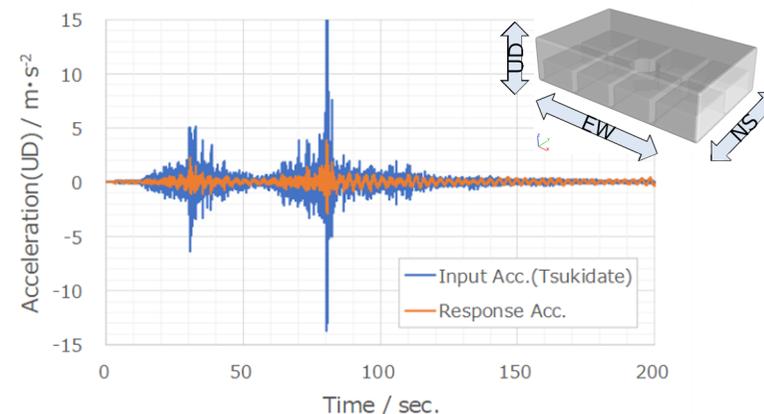


解析モデル

想定される成果

SMR級実規模プラントのモデル
+
地震絶縁システム

地震絶縁システムの有効性を確認



東大 電力需給モデルで前提とする
SMR立地の成立性を確認

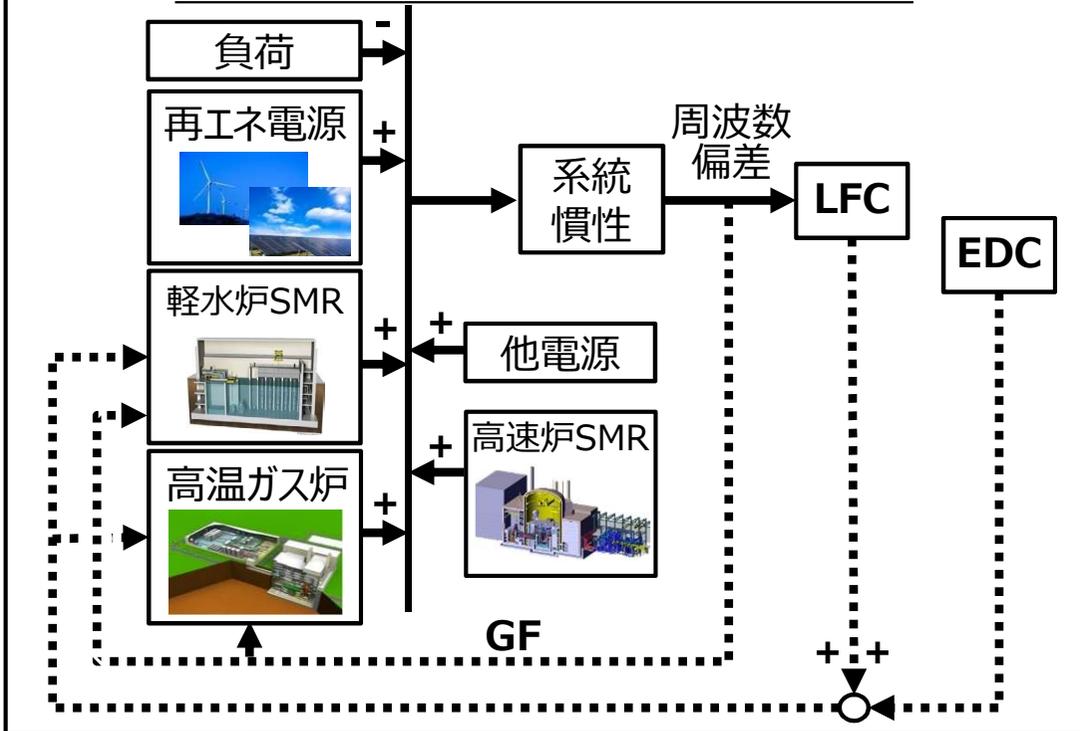
原子力システム導入戦略分析用原子力システム技術の評価 (3/3)

負荷追従性能評価

目的 電力需給・周波数シミュレーションによりSMRの調整力が再エネが大量導入された電力システムの周波数安定性維持に有効であることを示す。

進捗 今年度、電力需給・周波数シミュレーションモデルを整備完了予定。

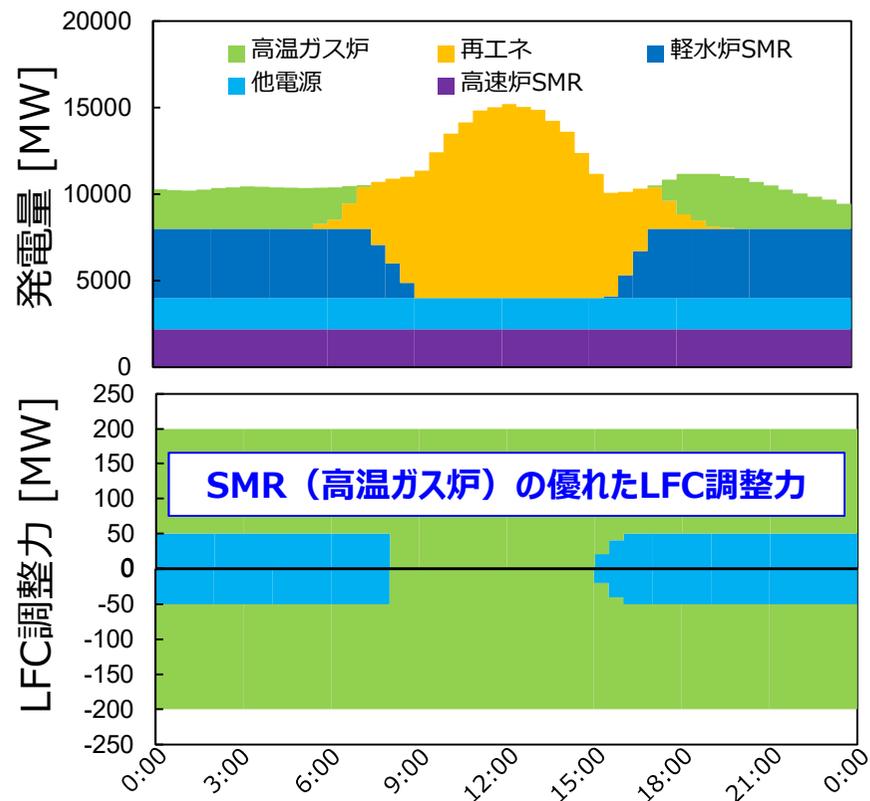
電力需給・周波数シミュレーションモデル



負荷追従率上下限、最低出力、部分負荷効率

東大 電力需給モデル

想定される成果



多目的利用システムモデルの開発

水素サプライチェーン・CO₂再資源化システムについての特性データベースの構築

目的 水素サプライチェーン（メタン熱分解）・CO₂再資源化システム（メタネーション、FT軽油、MTGガソリン）に係るデータベースを構築し、エネルギーシステム（作成：エネ経研）を精緻化。

進捗 昨年度で概ね完了。

水素サプライチェーン・CO₂再資源化システムの特性データ

製品製造量[ton/年]（原料、副生成物も含む）、設備費[¥/(ton/年)]、電力[kWh/ton-製品]、加熱量[kWh/ton-製品]、その他運転費[kWh/ton-製品]等

メタン熱分解の標準的な製品製造量、原料供給量

製品製造量	原料CH ₄	副生炭素
[ton/年]	[ton/年]	[ton/年]
223,000	972,000	731,000

FT軽油の標準的な製品製造量、原料供給量

製品製造量	原料CO ₂	原料H ₂	副生水	副生C5-C14※
[ton/年]	[ton/年]	[ton/年]	[ton/年]	[ton/年]
2,184,000	8,458,000	1,153,000	7,055,000	687,000

※：軽油以外の液体燃料の意

メタネーションの標準的な製品製造量、原料供給量

製品製造量	原料CO ₂	原料H ₂	副生水
[ton/年]	[ton/年]	[ton/年]	[ton/年]
665,000	1,826,000	334,000	1,495,000

MTGガソリンの標準的な製品製造量、原料供給量

製品製造量	原料CO ₂	原料H ₂	副生水	副生LPG※
[ton/年]	[ton/年]	[ton/年]	[ton/年]	[ton/年]
649,000	2,382,000	326,000	1,918,000	44,000

※：LPG相当のガス燃料の意

多目的利用システムモデルの開発

蓄電池の充放電による劣化性能を考慮した特性データベースの構築

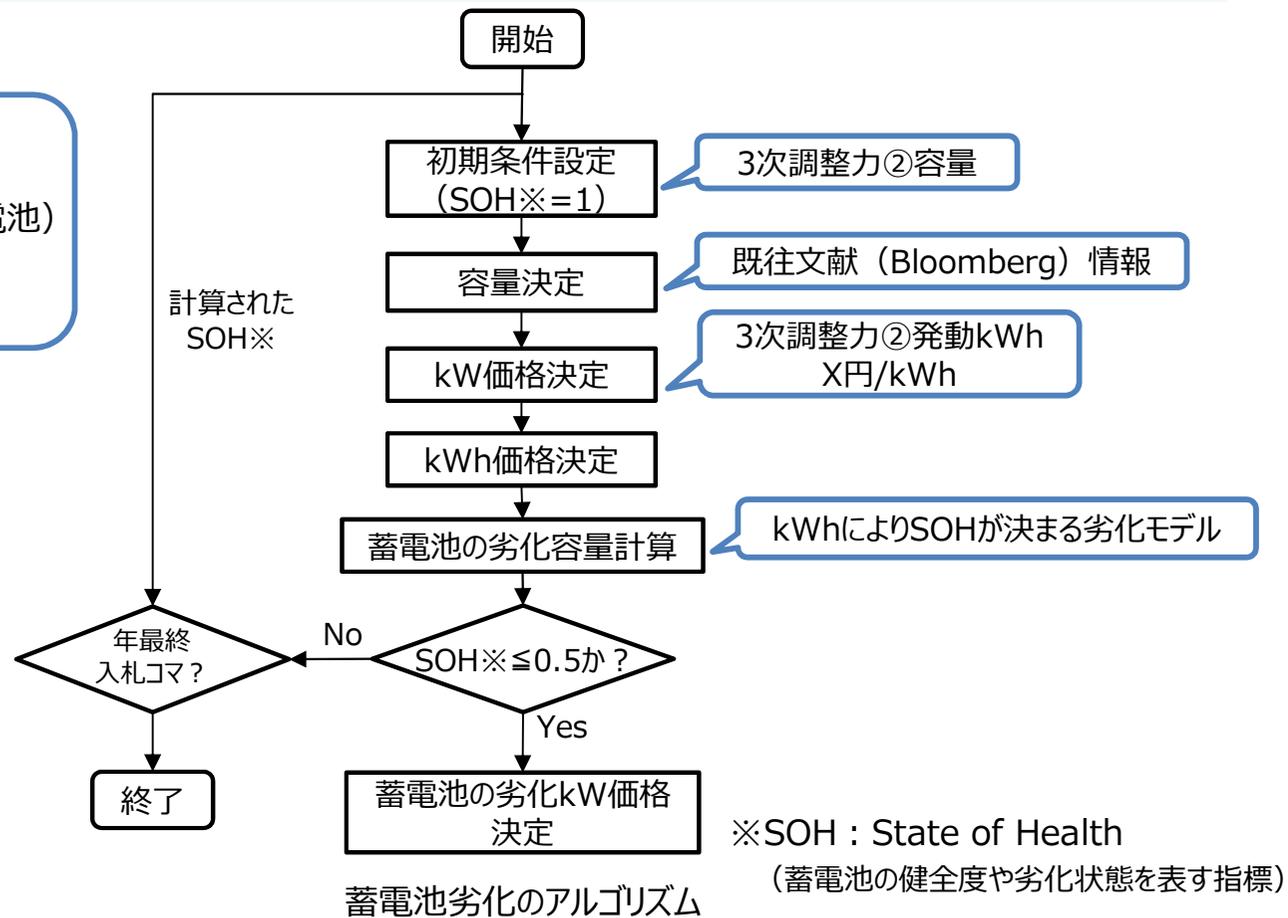
目的 蓄電池に対して充放電による劣化性能を考慮した特性データ構築に資する情報収集し、電力需給モデル（作成：東大）を精緻化。

進捗 電力需給モデルにインプットする要件の整理、蓄電池劣化のアルゴリズム作成完了。

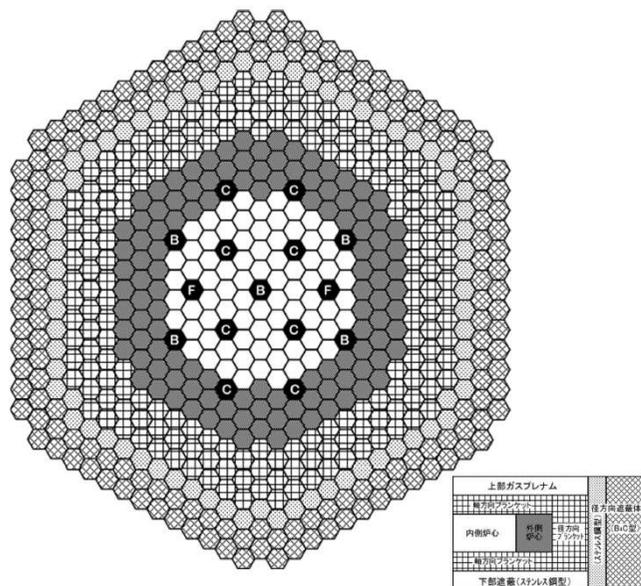
電池の劣化性能を考慮した特性データ

- ◆ 電池の導入コスト
 - ✓ 固定費[kW]
 - ✓ 固定費[kWh]
 - ✓ 劣化[kWh]
 - ・充放電サイクル寿命
 - ・放電深度の考え方
 - ・モデルの信頼性評価
- ◆ 電池のサイクル寿命
- ◆ 耐用年数
- ◆ 充放電効率
- ◆ 自己放電ロス率
- ◆ Cレート 等

対象電池：
● NMC電池
(Ni-Co-Mn-Cd電池)
● LFP電池
(Li-Fe-PO₄電池)



対象とする原子炉システム技術の評価



- 内側炉心燃料集合体
- 外側炉心燃料集合体
- ⊕ 径方向ブランケット
- ⊗ ステンレス鋼遮蔽体
- ⊘ B4C遮蔽体
- ⓐ 主炉停止系制御棒 (CCR)
- ⓑ 主炉停止系制御棒 (FCR)
- ⓓ 後備炉停止系制御棒

図 JAEAより提示炉心
30万kWe 金属燃料炉心(高増殖炉
心検討)の炉心配置

2021年度版

増殖比 1.69

主要核特性・制御反応度収支成立見込

工学的安全の成立性の観点から以下の項目についてを以下の観点からレビュー・課題を抽出中
(2021年度設計炉心対象)

- ・工学的成立性の観点からのコメント
- ・2050年頃の実用化に向けた技術課題の抽出
- ・その他



準静的フィードバック評価結果より

- ・炉心湾曲による負の反応度フィードバック効果が期待できない場合、ULOF とUTOP で静定時の出口温度が高くなると、全反応度は大きくなる傾向 (ボイド反応度が大きいため)
- ・UTOP については、CR 誤引き抜き反応度によりロッドストップといった反応度挿入制限必要。過渡状態での挙動にも注意が必要

炉心特性について、今後レビューをまとめていく予定

3. 次年度計画

(1)電力レジリエンス分析ツールの開発(東京大学)

- ① SMRを考慮した電力需給モデルの開発： SMRならびにCCUS技術を組み込んだ詳細な地理的・時間的解像度を有する電力需給モデルを開発し、そして、前提条件や計算結果のデータの入出力システムの整備を実施する。
- ② 電力需給モデルによる数値シミュレーション分析： SMRならびにCCUS技術を組み込んだ電力需給モデルを用いて、技術の将来シナリオ等を踏まえた数値シミュレーションを実施し、SMRの導入可能性を経済合理性の観点から検討する。

(2)エネルギー需給分析モデルの開発(エネ経研)

- ① エネルギー需給分析モデル構築・特性データベース整備： 昨年度着手したエネルギー需給分析モデル及び特性データベースについて、他研究項目の成果や最新の既往研究事例等も踏まえた上で、モデルの構築及びデータベースの整備を行う。更に、エネルギー政策に係る国内外の最新の動向を踏まえた上で、試計算を実施し、モデル・データベースの有効性を確認する。

(3)原子カシステム導入戦略分析用原子カシステム技術の評価(原子力機構)

- ① 原子カシステムの燃料サイクル諸量の評価
核燃料需給バランス及び使用済燃料の主要核種の燃焼もしくは崩壊による組成変化を考慮して諸量特性を評価できるシステムを整備するとともに、高増殖比達成技術を採用した高速炉炉心に対して過渡解析を実施して安全性に関する性能評価を行う。
- ② 原子カシステムの新規導入地点に係るサイト影響の評価
R3年度に実施した3種類の地震動を用いた安定性評価の結果から、地震絶縁システムを適用した建屋の概念・技術的成立性、課題を整理する。
- ③ 原子カシステムの負荷追従性能の評価
R3年度に整備を完了したSMRプラントモデルの電力需給シミュレーションモデルへの組み込みを完了する。
- ④ 原子カシステム技術評価結果のレビュー
原子カシステム導入戦略分析ツールのインプットとなる原子カシステム技術に関する専門家委員会を開催し、原子カシステム技術評価の検討結果についてレビューする。

(4)多目的利用システムモデルの開発(日揮グローバル)

- ①水素サプライチェーンシステム・CO₂再資源化システム、蓄電池の劣化性能を考慮した特性データベースの構築
電力需給モデルおよびエネルギー需給分析モデルに必要な特性データ(蓄電池等)の構築およびそれに必要な解析モデルを検討する。

(5)対象とする原子カシステム技術の評価(三菱重工)

- ①原子カシステム導入戦略分析ツールのインプット条件の評価
原子カプラントメーカーの知見に基づき、原子カシステム導入戦略分析ツールのインプット条件として用いる原子カシステム技術の工学的成立性について評価する。