

2050年脱炭素社会に向けて
—原子力発電の新增設・リプレースが必須である—
(講演-3)

次世代軽水炉新增設・リプレースに向けた 条件整備と提言

令和3年9月15日(水) 15:50~16:20 WEB開催

金氏 顯

(かねうじ あきら)

日本原子力学会フェロー
エネルギー問題に発言する会・会長
元三菱重工業代表取締役常務

第1章 我が国の1970年代から2000年代初頭までの建設ラッシュ時代の苦難と成功体験

～米国技術導入し早期に国産化、約40年掛けて56基建設しながら世界に冠たる技術を創り上げてきた。その技術は世界トップレベルとなり、多くの技術者と技能者を育成し、安価安定電力供給と二酸化炭素排出削減にも大きく貢献。

第2章 2000年代初頭より暗転、2011年東電福島第一事故以降原子力を取り巻く環境激変と原子力産業界の現状、課題

～今や我が国はその貴重な人材、技術力、製造・建設能力を失う危機に直面している。しかし、各メーカーは国内大型工事、海外建設プロジェクトなどで人材とサプライチェーンの維持に尽力中。

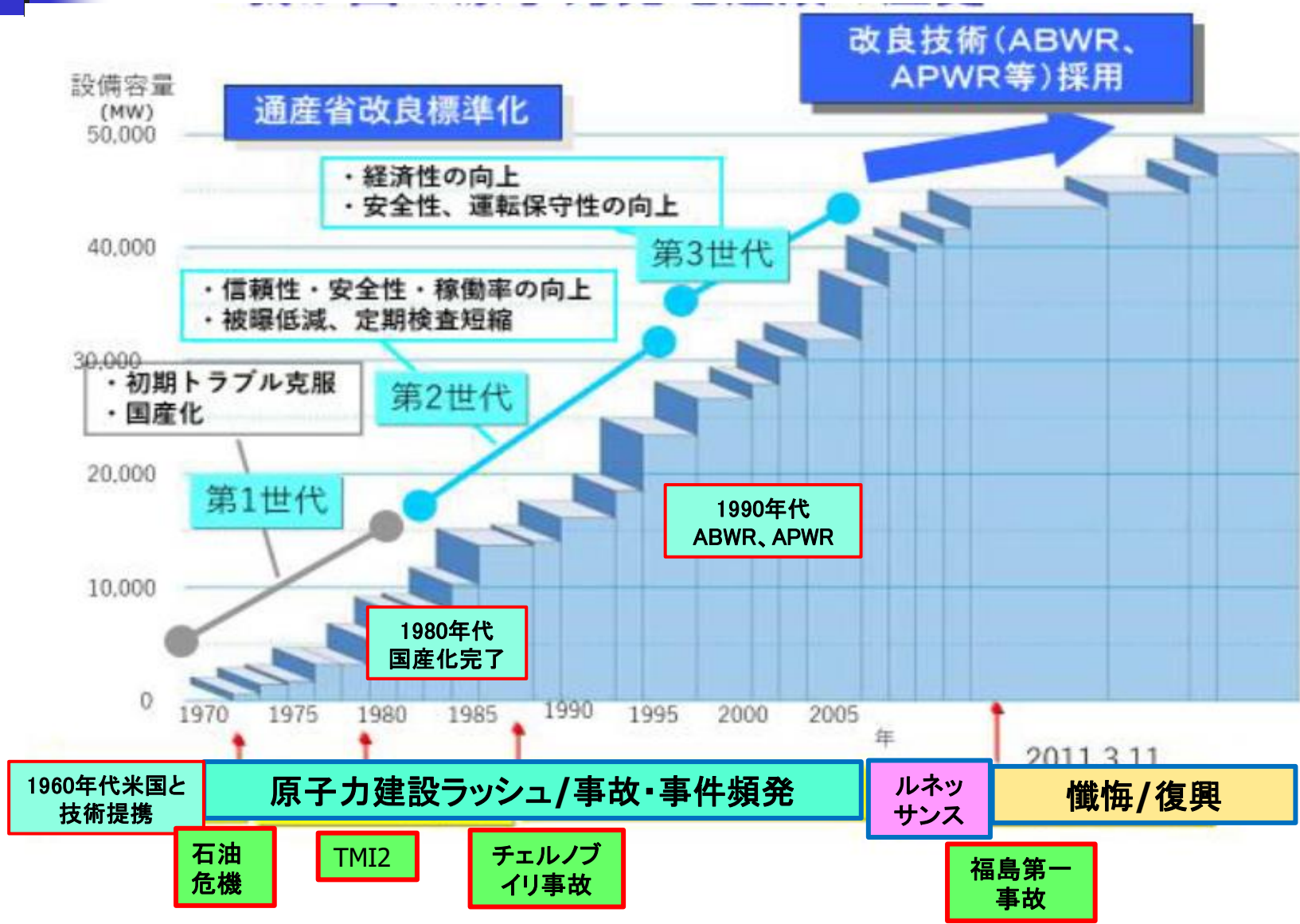
第3章 1990年代後半～2010年代の仏・米の失敗と中・ロ・韓、また1970～2000年代の日本の成功、それぞれの要因

～OECD/NEA“Unlocking Reduction in the Construction Costs of Nuclear : A Practical Guide for Stakeholders” (July, 2020)”から学ぶ失敗と成功、教訓

第4章 国、規制委、電力、メーカー、産業界など関係者への提言

～過去の成功体験、仏米の失敗体験と仏のリベンジ、我が国の現状認識から、次世代軽水炉24基建設に向けての提言

日本の原子力発電50年の歩みと時代区分



軽水炉改良標準化の歩み(PWRの場合)

4

PWRを例にお話しますが、BWRの場合もほぼ同様です。

【第1世代】**輸入と国産化**

米国Westinghouse社より初号機輸入、2号機以降技術導入、SW,HW国産化

- **初期トラブル多発**: 蒸気発生器(SG), 炉内構造物(CI)、燃料等に材料腐食、減肉、磨耗、流動振動等。原因究明、研究開発、再発防止対策
- **機器の国産化**: 原子炉容器、SG、制御棒駆動装置、一次冷却材ポンプ、CI、燃料集合体⇒**約10年かけて玄海2号機で100%国産化**

【第2世代】**建設経験, 運転経験の反映, 信頼性の向上**

- SG、CI、燃料等主要機器の設計・材料・構造などトラブル経験を反映し、改良し**信頼性向上**⇒第1世代にもバックフィット
- 保守性、運転操作性、耐震性、機器品質向上、建設性、被ばく低減

【第3世代】**経済性, 信頼性・安全性の更なる向上**

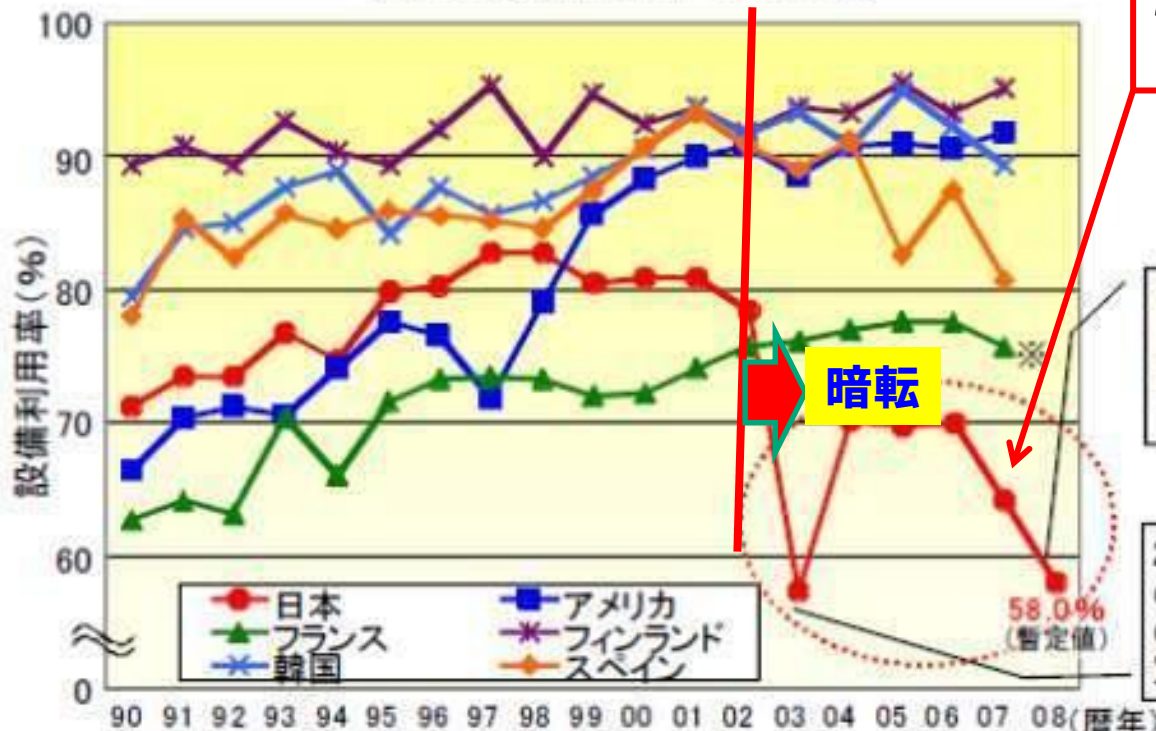
- SG、インコネル合金溶接部などに**経年劣化トラブル発生**、原因究明、研究開発、再発防止対策⇒第1、2世代にもバックフィット
- **安全性、経済性、設計合理化、耐震性、運転操作性の更なる向上**

【APWR】**日本型軽水炉集大成**

- 出力増大、安全性、信頼性、経済性など**日本型PWR集大成**
⇒**泊3号機に反映(H21年12月運転開始、最新鋭PWR)**

1990年代後半設備利用率米国を凌駕したが、その後不祥事などにより暗転

世界の設備利用率との比較



2007年度はPWRは75.7%、BWRは51.5%、平均61%

2007年7月の中越沖地震による柏崎刈羽原発の運転停止等により、58.0%まで低下。

2002年8月の電気事業者の不正に起因する点検等のため、定検前倒し及び定検期間延長。

- **トラブル発生件数**：1980年3.2件/年⇒2010年0.1件年に激減
- **計画外停止率**：2008年0.07/年<米国0.28、**世界一**
- **設備利用率**：1990年代後半には80%台を達成。米国より調査団も来日。
- 2002年東電データ改竄問題、2004年美浜3号機人身事故、2007年中越沖地震等、**不祥事や規制強化の負のスパイラルにより設備利用率は急降下。**

第1章 我が国の1970年代から2000年代初頭までの建設ラッシュ時代の苦難と成功体験

～米国技術導入し早期に国産化、約40年掛けて56基建設しながら世界に冠たる技術を創り上げてきた。その技術は世界トップレベルとなり、多くの技術者と技能者を育成し、安価安定電力供給と二酸化炭素排出削減にも大きく貢献。

第2章 2000年代初頭より暗転、2011年東電福島第一事故以降原子力を取り巻く環境激変と原子力産業界の現状、課題

～今や我が国はその貴重な人材、技術力、製造・建設能力を失う危機に直面している。しかし、各メーカーは国内大型工事、海外建設プロジェクトなどで人材とサプライチェーンの維持に尽力中。

第3章 1990年代後半～2010年代の仏・米の失敗と中・ロ・韓、また1970～2000年代の日本の成功、それぞれの要因

～OECD/NEA“Unlocking Reduction in the Construction Costs of Nuclear : A Practical Guide for Stakeholders” (July, 2020)”から学ぶ失敗と成功、教訓

第4章 国、規制委、電力、メーカー、産業界など関係者への提言

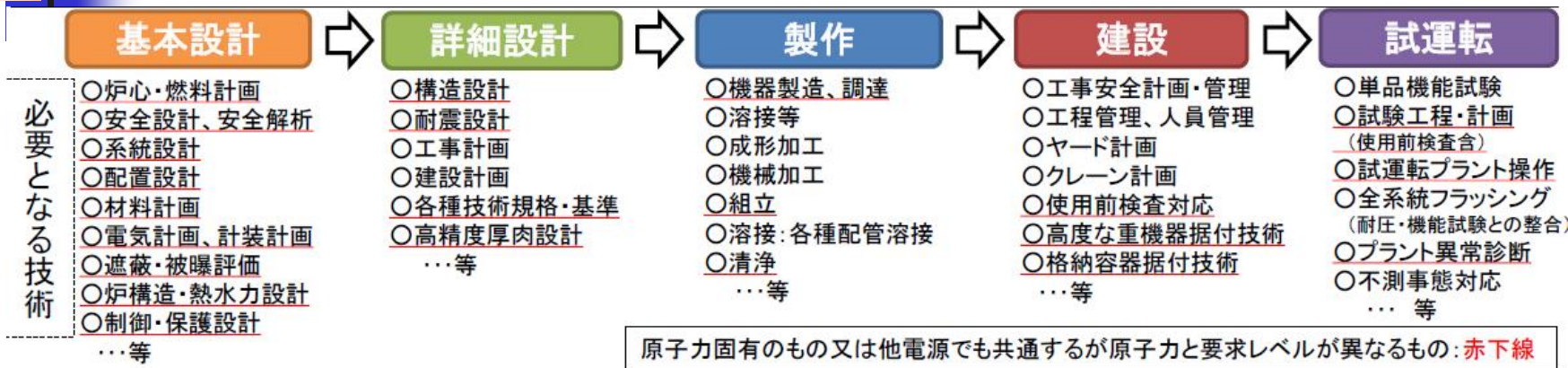
～過去の成功体験、仏米の失敗体験と仏のリベンジ、我が国の現状認識から、次世代軽水炉24基建設に向けての提言

原子炉メーカー・電力の建設空白期間

原子炉メーカー	F1事故前の最後の建設プラント	同運開時期	2021年時点建設空白期間
東芝	中部電力浜岡5号	2005年1月	16.5年間
日立	中国電力島根3号、電発大間、東電東通1号	2011年3月 建設中断	10.5年間
三菱重工	北海道電力泊3号	2009年12月	12年間

電力会社	最後の運開時期	2021年時点空白	電力会社	最後の運開時期	2021年時点空白
北海道電力	2009年12月	12年間	関西電力	1993年2月	28.5年間
東北電力	2002年1月	20年間	中国電力	2011年3月(中断)	10.5年間
東京電力	1997年7月	24年間	四国電力	1994年12月	27年間
北陸電力	2006年3月	14.5年間	九州電力	1997年7月	24年間
中部電力	2005年1月	16.5年間	日本原電	1987年2月	34.5年間
			電源開発	2011年3月(中断)	10.5年間

原子力「新增設」に必要な技術と人材育成



各工程における経験の蓄積と技術開発とのフィードバック



第47回原子力委員会定例会(H24.10.30)資料1-1を一部修正 27

○新規の原発建設は既に10年以上も途絶えて、原子炉メーカーの設計・建設経験者は約1/3になっている。

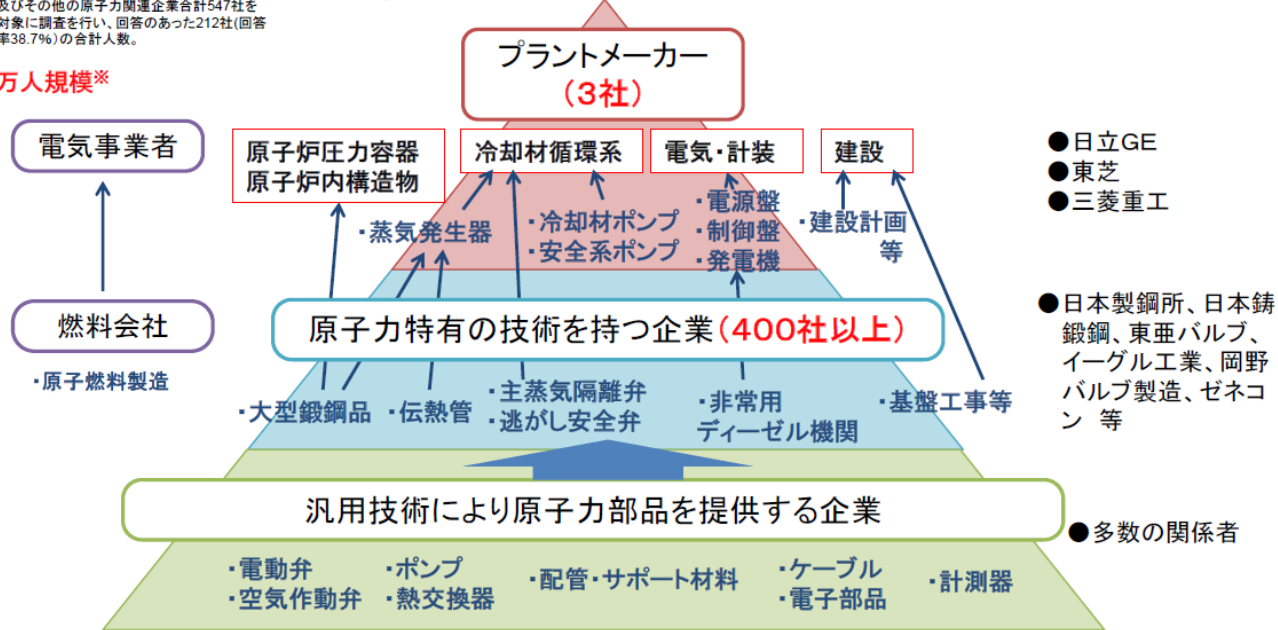
○しかし、各メーカーは安全対策工事、大型保全工事、海外建設プロジェクト(その後撤退)、海外機器取替工事などを通じたOJT、社内外教育訓練を通じたOff-JTにより技術維持伝承と新技術開発を通じて、来るべき新增設・リプレースに備えて人材の育成に取り組んでいる。

原子力「新增設」に必要なサプライチェーンと維持

※ 社団法人原子力産業協会「原子力発電に係る産業動向調査2010報告書」より会員企業及びその他の原子力関連企業合計547社を対象に調査を行い、回答のあった212社(回答率38.7%)の合計人数。

約5万人規模※

原子力発電のサプライチェーン



第47回原子力委員会定例会(H24.10.30)資料1-1を一部修正

32

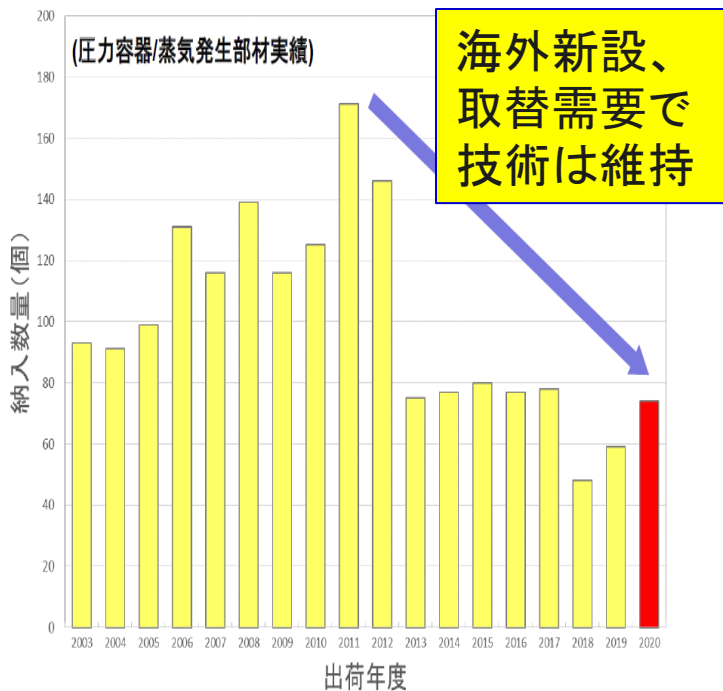
○新規建設のめどが立たない状況では原子力産業界各企業は技術、人材、品質管理も伝承困難。既に一部企業が廃業や事業撤退⇒次ページ参照

○しかし、各原子炉メーカーでは安全対策工事、大型保全工事、海外機器取替工事などを通じてサプライチェーンの維持、さらに廃業や事業撤退には代替メーカー開拓、図面移管し内製化などにより対応し、来るべき新增設・リプレースに備えてサプライチェーンの維持に努めている。

日本製鋼所・大型鍛造品

原子炉压力容器、蒸気発生器部材の製造実績

- 国内新規案件向けとしては約15年前が最後の実績
- 現在は海外の取替および新規案件が主



日本製鉄(SGインコネルチューブ)

- ・震災前:年間1600トン(8基分)能力増強
 - ・震災後:売上1/10、2020年度は100トン
- 海外新設や取替需要で技術は維持。

原子力製品事業者の廃業

- ・ジルコプロダクツ(BWR燃料被覆管)
- ・日本鑄鍛鋼(RV,SG,タービン軸鍛造)

原子力事業から撤退

- ・川崎重工(SG等部品、水素再結合装置)
- ・甲府明電舎(電動弁用直流モーター)
- ・スタッドテンショナーのメーカー
- ・空気圧縮機メーカー
- ・ベローズ弁メーカー

代替メーカー開拓等で技術は維持。

2021年4月14日

エネ庁021.4.14..原子力人材・技術・産業基盤の維持・強化について

第1章 我が国の1970年代から2000年代初頭までの建設ラッシュ時代の苦難と成功体験

～米国技術導入し早期に国産化、約40年掛けて56基建設しながら世界に冠たる技術を創り上げてきた。その技術は世界トップレベルとなり、多くの技術者と技能者を育成し、安価安定電力供給と二酸化炭素排出削減にも大きく貢献。

第2章 2000年代初頭より暗転、2011年東電福島第一事故以降原子力を取り巻く環境激変と原子力産業界の現状、課題

～今や我が国はその貴重な人材、技術力、製造・建設能力を失う危機に直面している。しかし、各メーカーは国内大型工事、海外建設プロジェクトなどで人材とサプライチェーンの維持に尽力中。

第3章 1990年代後半～2010年代の仏・米の失敗と中・ロ・韓、また1970～2000年代の日本の成功、それぞれの要因

～OECD/NEA“Unlocking Reduction in the Construction Costs of Nuclear : A Practical Guide for Stakeholders” (July, 2020)”から学ぶ失敗と成功、教訓

第4章 国、規制委、電力、メーカー、産業界など関係者への提言

～過去の成功体験、仏米の失敗体験と仏のリベンジ、我が国の現状認識から、次世代軽水炉24基建設に向けての提言

OECD・NEA原子力新設コスト抑制専門家会合

■2017年、専門家グループ“Reduction the Cost of Nuclear Power Generation”会合。座長：仏原子力庁研究者、10か国&IAEA、計12名（日本エネルギー経済研究所村上朋子（当時原子力Gマネージャー））。

■2020年7月”Unlocking Reduction in the Construction Cost of Nuclear. A Practical Guide for Stakeholder”発表。

■EPR、AP-1000初号機（FOAK）のコスト・オーバーランの根本要因

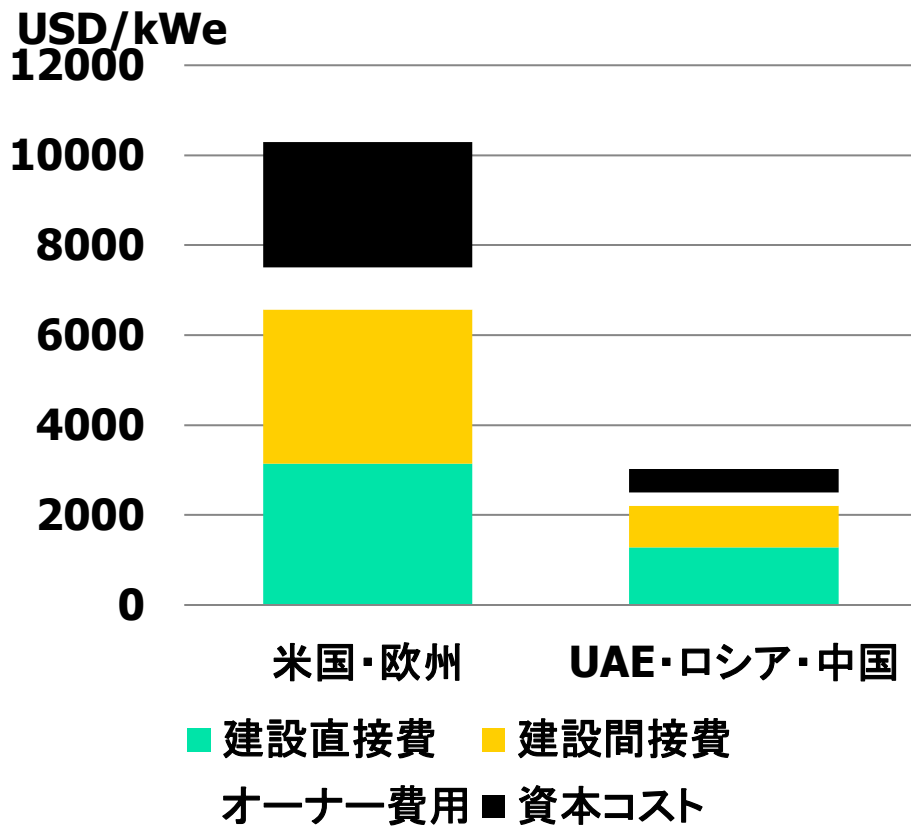
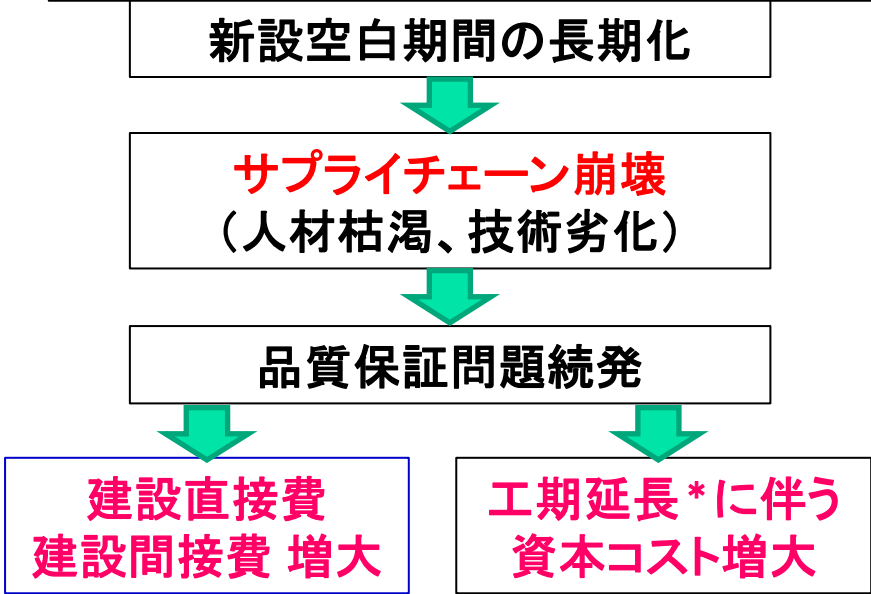
- ①設計の未熟さ：フィンランド・オルキルオト3号はEPR初号機
- ②EPCの非効率なプロジェクト管理：フィンランド未経験、米国34年ぶり再開
- ③安定性・予見性に欠ける規制：炉の設計未熟、規制機関の知見不十分
- ④単機効果：オルキルオト3号、フラマンビル3号共に単機建設
- ⑤仏国内で16年ぶりに2007年フラマンビル3号、着工。米国内34年間新設なし。その間、メーカー、サプライチェーン、電力、規制当局全ての力量低下。

●根本原因：長期的に新規建設が途絶えたことに起因する。

⇒1970～2000年代の日本、1980年代のフランス、1990～2000年代の韓国、現在の中国やロシアでは連続して多くの建設が行われ大幅なコストダウンを達成。

米国・欧州の原発新設再開における誤算

- ・米国では1978年以来新規発注が無かったが、2013年にVogle3,4に着工
- ・欧州では14年ぶりに2003年にOlkiluoto3に、2005年にFlamanville3に着工
- ・ロシア、中国、UAEでは新設が継続的に行われ、安価な建設コスト



プラント名称	工期(年)	
	当初計画	実績予想
Vogle3,4(US)	4	9~10
Olkiluoto3(フィンランド)	5	16
Framanbil-3(フランス)	5	15

“Unlocking Reduction in the Construction Costs of Nuclear : A Practical Guide for Stakeholders”
OECD NEA, July 2020)

OECD・NEA原子力新設コスト抑制専門家会合 (つづき)

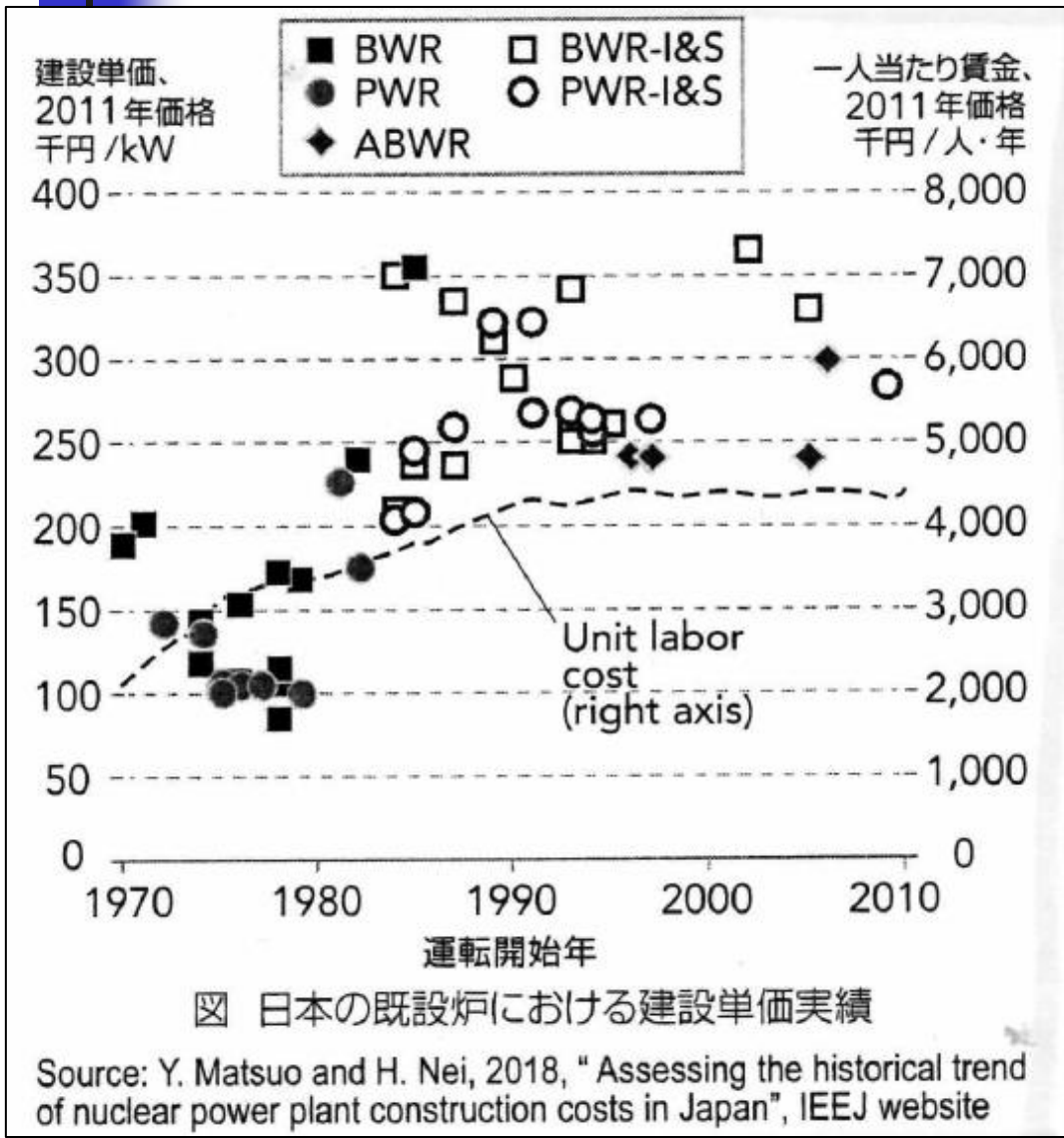
■総括:8項目の政策提言。

- ①先進国における第3世代初号機の建設プロジェクトの経験・教訓をしっかりと学習し、共有すること。
- ②設計の早期成熟化と規制の予見性を高めること。
- ③原子力政策の上で、将来の建設・運転計画を強固に位置付けること。
- ④サプライヤーも含めた産業界の基盤を強化すること。特にサプライヤーは他分野の部品製造業者が原子力分野に参入するので原子炉メーカーはサプライヤーとの継続的情報共有・対話・議論が課題。
- ⑤革新技術開発を支援すること。
- ⑥市場制度と資金調達スキームの安定性を確保すること。
- ⑦社会的受容性も含め、原子力事業環境の向上を図ること。
- ⑧新設経験の少ない国や初導入の国における政策関与を強化すること。



全ての政策提言は我が国のこれからの
次世代軽水炉建設に当てはまる。

我が国の1970年～2000年代の成功体験



I&S: Improvement and Standardization (改良標準化)

建設コストは1980年代に高騰したが、それでもUS\$4000/kW以下と非常に安価である。

ABWR初号機は改良標準化の集大成、しかし

■ OECD/NEAは新設初号機を成功させた模範事例として**ABWR初号機東電・柏崎刈羽6, 7号機の建設(1996年運開)を絶賛**
⇒ 建設単価 < US\$2,400/kW

- ・効果的なプロジェクト管理
- ・安定し、予見可能な許認可プロセス
- ・着工前の詳細なエンジニアリング
- ・実機製作前のTest-before-Use
- ・詳細な仕様書付早期購入契約
- ・改良建設工法

* 記録的に短工期(52か月)達成
* 計画通りの建設費で完成

■ しかし、2011年以降の安全対策コストは原発31基(31GW)450兆円(*) ⇒ 14.5万円/kW(～US\$1,400/kW) ⇒ 建設コストの約1/3!

■ 多くはまだ審査中で最終的な安全対策コストは不明。⇒ 次世代軽水炉の建設コストアップの不安要素。

フランス政府の素早い対応

- **アレバ**はOlkiluoto3、Framanbil-3など一連のEPR(European PWR)建設の失敗で危機に。
- **フランス政府**はアレバから原子炉・サービス・燃料製造部門を切り離し2018年に**EDF**(フランス電力)子会社として**フラマトム**を発足。
- **フラマトム**はEPRを建設し続けるのは困難として**EPR2**の開発を決定。
【**EPR2**開発の主な目標:2020年に基本設計完了予定】。
 - 設計の簡素化
 - 建設工法の改善
 - 設備の標準化
 - 格納容器の単層化
 - 安全系統の三系統化
 - 安全性を確保を前提とした建設費30%削減
- **EDF**は**EPR2**をフランス国内に6基、英国に4基、インドに6基建設することを計画中。合わせて原子力産業サプライチェーン再構築推進中。

第1章 我が国の1970年代から2000年代初頭までの建設ラッシュ時代の苦難と成功体験

～米国技術導入し早期に国産化、約40年掛けて56基建設しながら世界に冠たる技術を創り上げてきた。その技術は世界トップレベルとなり、多くの技術者と技能者を育成し、安価安定電力供給と二酸化炭素排出削減にも大きく貢献。

第2章 2000年代初頭より暗転、2011年東電福島第一事故以降原子力を取り巻く環境激変と原子力産業界の現状、課題

～今や我が国はその貴重な人材、技術力、製造・建設能力を失う危機に直面している。しかし、各メーカーは国内大型工事、海外建設プロジェクトなどで人材とサプライチェーンの維持に尽力中。

第3章 1990年代後半～2010年代の仏・米の失敗と中・ロ・韓、また1970～2000年代の日本の成功、それぞれの要因

～OECD/NEA“Unlocking Reduction in the Construction Costs of Nuclear : A Practical Guide for Stakeholders” (July, 2020)”から学ぶ失敗と成功、教訓

第4章 国、規制委、電力、メーカー、産業界など関係者への提言

～過去の成功体験、仏米の失敗体験と仏のリベンジ、我が国の現状認識から、次世代軽水炉24基建設に向けての提言

2050年カーボンニュートラル達成の為に 次世代軽水炉24基建設が必要

- 2050年CN達成には原子力発電の寄与率1/3の堅持が不可欠
- 2050年原子力発電供給量 : 4,387億kWh(2030年計画の1.4倍)
- 必要原発容量(稼働率90%) : 55.5GW = 既設再稼働23.7GW + 新設31.8GW
- 次世代PWR(120万kW)・BWR(138万kW)x24基(各12基)
- 次世代PWRも次世代BWRも基本設計の見通しは得られている。

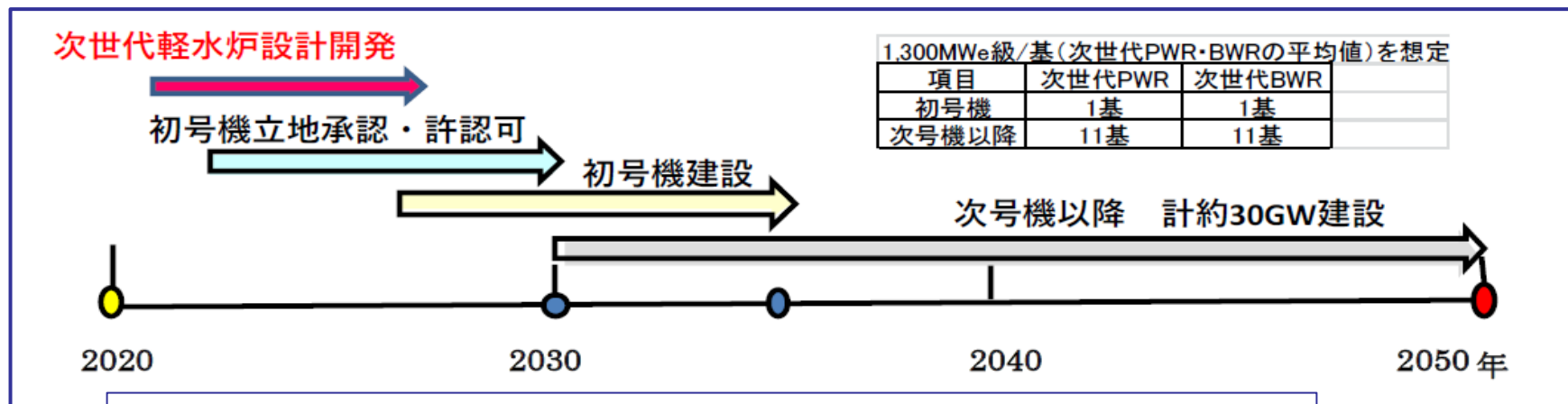


図 次世代軽水炉新增設・リプレースのマスタースケジュール

- ◇ 我が国の建設実績 : 1970年～2000年代の30年間に54基を建設
- ◇ 立地敷地 : 計画中7基、廃炉敷地など電力会社現保有敷地内

日本機械学会動力エネルギーシステム部門 原子力・再エネ調和型エネルギーシステム研究会

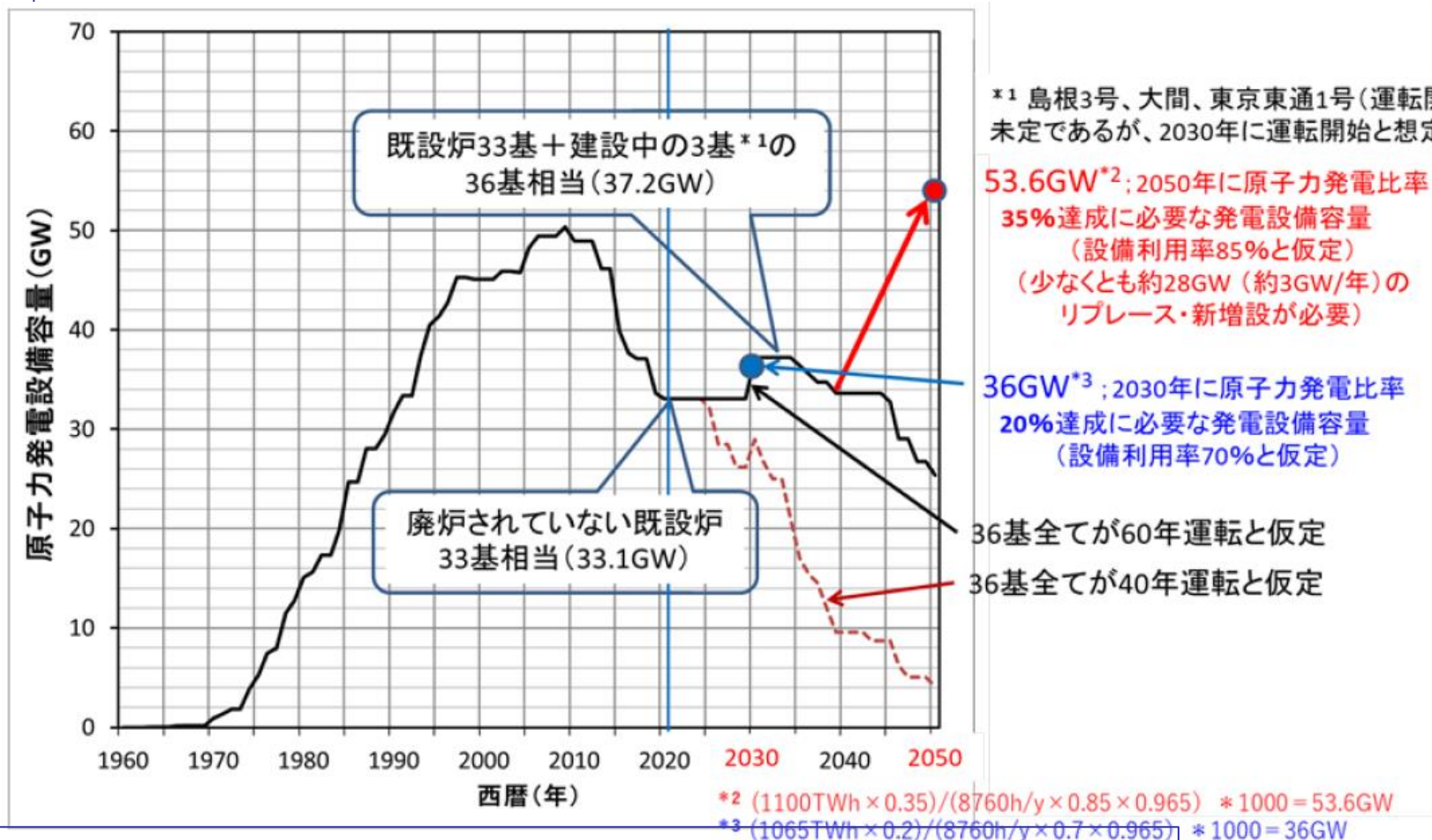
■2050年に向けてエネルギーの安定供給と脱炭素化を進めていくには再エネと原子力が調和するエネルギーシステムを開発する必要があり、2019年4月から2021年3月の2年間、産学官47名の会員で研究。

表 4.3-2 電源エネルギーミックスの目標（脱炭素電源の年間発電量比率の目標）

	現状 (2019年度)	2030年度	2050年
安定再生可能エネルギー	10.6%	13.5~14.9%	15%以上
変動性再生可能エネルギー (太陽光:風力)	7.5% (9:1)	8.7% (4:1)	40% (1:1)
CCUS付き火力エネルギー	0%	0%	5%
火力(天然ガス、石炭、石油)	75.7%	56%	0%
スマートコミュニティ (SC)	0%	0%	5%
原子力エネルギー	6.2%	20~22%	35%
年間総発電力量	1028TWh	1065TWh	1100TWh
脱炭素電源の総発電量比率	24.2%	42.2~45.6%	100%

機械学会・原子力・再エネ調和型エネ研究会(つづき)

■ 2050年に原子力で総発電量の35%を賄うために必要な原子力発電容量は53.6GW、稼働率85%として約28GWの新增設リプレースが必要。



次世代軽水炉新增設予定地(例)



敦賀原発3、4号機の増設予定地



上関原発の建設予定地



川内3号機の完成予想図



東電東通1、2号機完成予想図

■国への提言

①長期原子力活用方針の政策明確化

- ・当面:「新增設・リプレース」の明記⇒第6次エネ基【案】を改訂
- ・長期:政策司令塔設置し、研究、開発、利用の長期計画策定。
- ・立地自治体の持続的発展の支援、円滑な対話の継続。

②科学的根拠に基づく国民への正しい情報発信と理解促進

- ・これまでのエネ庁による理解活動に加えて、全国各地での市民との双方向対話会開催、原子力施設見学会開催、原子力有識者制度など民間活用、小中高向けエネルギー教育副読本制作。

③運転期間の法的見直し(40年制限の撤廃、審査期間の控除)

- ・科学的かつ技術的な根拠に基づく制度構築。

④原子力規制の国際的視点からの法改正(IAEA、米国・英国など)

- ・確立された国際的な基準に基づく具体的な安全規制となる法改正。



☆OECD/NEALレポートから、特に①、②は重要！

■原子力規制への提言

- ① 新增設・リプレースに向けた法令・基準・規則・指針等の整備
 - ・F1事故前の関連法令等の見直し、型式認定
- ② 審査のスピードアップ、標準審査期間設定、不服申立制度導入
 - ・行政手続法に基づく標準審査期間。
 - ・規制当局と事業者(被規制者)の対等なコミュニケーション確立。
- ③ 安全目標制定、確率的リスク評価導入による審査予見性向上
 - ・国際基準に沿った安全目標による合理的な審査。
- ④ 規制当局の人材と能力の充実
 - ・原子力規制委員に専門スタッフを専属。
 - ・電力、原子炉メーカーから優秀人材の規制委、規制庁へ提供
- ⑤ 脅威レベルに対応した核防護構築(テロ対策等特別重要施設見直し)
 - ・意図的航空機衝突防護特重施設要求の合理的な見直し等。



☆OECD/NEALレポートから、特に①～③は重要！

原発新增設・リプレースの環境整備提言(つづき)

■電気事業者への提言

総括原価制度が無い自由化市場では新設建設資金調達の新たな制度が必要⇒OECD・NEALレポートでは下記を紹介。

- ①公益企業ファイナンス・モデル(フランス、ロシア、韓国)
- ②複数企業プロジェクトファイナンス・モデル(米国、英国、UAE、トルコ)
- ③ハイブリッド・モデル(フィンランド・Mankala model:長期電力購入契約(PPA)による複数エネルギー産業参加)
- ④政府による支援策:Fit-CfD、RABモデル(実施例はまだ無い)

②が世界の主流の方式。

- ・建設する原子力発電所毎にプロジェクト会社を設立。その会社が主体となって「Equity」(共同経営者からの出資)と「Debt」(借入)二本立てで資金集め。そして建設し運用。
- ・共同経営者には持ち株額に比例した利益還元。



☆電力自由化・送配電分離の現状において、投資調達の仕組みと投資回収を容易にする料金体系が電気事業者の最大の経営開発課題。

■原子炉メーカーへの提言

- ①安全対策工事、大型保全工事、海外建設プロジェクト、海外機器取替工事などでの技術維持伝承と新技術開発を通じて、人材育成、新技術開発、サプライチェーンの維持に取り組むこと。
- ②島根3号、大間、東電東通1号の建設早期再開、原子炉メーカー協業
- ③次世代軽水炉(PWR、BWR)の初号機を想定し、基本設計、詳細設計、建設コスト評価を完了させ標準化、また新技術開発、プロジェクト管理技術開発、新建設技術開発にも取り組むこと。
- ④国際協力:世界中で進行中の建設プロジェクトに参画して知見・経験を取得(例えば英国のヒンクレーポイントC(EPR)、米国等でのSMR建設)
- ⑤原子力規制庁へ優秀な人材の提供



☆欧米でのコストオーバーラン防止の為に自助努力により可能な方策であり、来るべき新增設・リプレースに備えるために必須である。

1. まず、1960年代から2000年代初頭まで40年間に56基建設、世界に冠たる技術構築、安価安定電力供給とCO2削減に貢献した成功体験を振り返った。
2. しかし、2000年代初頭より暗転、2011年東電福島第一事故以降原子力を取り巻く環境は激変し、今や我が国はその貴重な人材、技術力、サプライチェーン崩壊の環境にあるが、各メーカーは国内大型工事や海外プロジェクト、取替工事などで維持伝承、新技術開発に尽力していることを認識した。
3. 一方、1990年代後半～2010年代の仏・米の失敗と中・ロ・韓の成功、また1970～2000年代の日本の成功、それぞれの要因と教訓を下記報告書などから学んだ。

“Unlocking Reduction in the Construction Costs of Nuclear
: A Practical Guide for Stakeholders” OECD/NEA (July, 2020)”

4. そして最後に、2050年カーボンニュートラル達成の為に必要な次世代軽水炉24基建設の実現の為に各関係者への提言を纏めた。

新增設初号機実現の
4大重要取組課題



- ・ 国の原子力活用政策明確化
- ・ 規制の予見性確保
- ・ サプライチェーン再構築
- ・ 投資資金調達方式構築



ご清聴ありがとうございました