

原子力安全部会セミナー
「新型炉の安全と安全規制」

革新炉の市場導入に必要な条件 － 軽水炉普及の歴史から －

2022年10月27日

日本エネルギー経済研究所

戦略研究ユニット 原子力グループ マネージャー

村上 朋子

本日のお話

1. 原子力利用の歴史を振り返る
2. 大型 vs 小型 (モジュール)
3. 顧客目線
4. 実用化の条件

199X年、某大学工学部原子力工学科



某教授

軽水炉にはいろいろ欠点がある。みんな文句
いっぱい言いながら使ってるんだよね。

なら、なぜ軽水炉？



蕪島のウミネコ 2021/7/17

1. 原子力利用の歴史を振り返る

(1) 原子力開発初期の炉 1950年代

- 1951年、米国で最初の原子力発電に成功。その炉EBR-Iは高速炉
- 最初の軽水炉（BWR）は1957年に米国で運転開始

1950年代に世界で発電開始した原子炉一覧

Country	Name	Type	Location	Reference Unit Power[MW]	Gross Electrical Capacity[MW]	First Grid Connection
Russia	APS-1 OBNINSK	LWGR	OBNINSK	5	6	1954/6/27
UK	CALDER HALL-1	GCR	SEASCALE	49	60	1956/8/27
UK	CALDER HALL-2	GCR	SEASCALE	49	60	1957/2/1
US	GE VALLECITOS	BWR	Pleasanton, Sunol	24	24	1957/10/19
US	SHIPPINGPORT	PWR	SHIPPINGPORT	60	68	1957/12/2
UK	CALDER HALL-3	GCR	SEASCALE	49	60	1958/3/1
UK	CHAPELCROSS-1	GCR	ANNAN	48	60	1959/2/1
UK	CALDER HALL-4	GCR	SEASCALE	49	60	1959/4/1
France	G-2 (MARCOULE)	GCR	MARCOULE	39	43	1959/4/22
UK	CHAPELCROSS-2	GCR	ANNAN	48	60	1959/7/1
UK	CHAPELCROSS-3	GCR	ANNAN	48	60	1959/11/1

出所) IAEA, Power Reactor Information System (PRIS)
<https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>

英国と米国が西側先進国の“トップランナー”で炉型は様々だった。

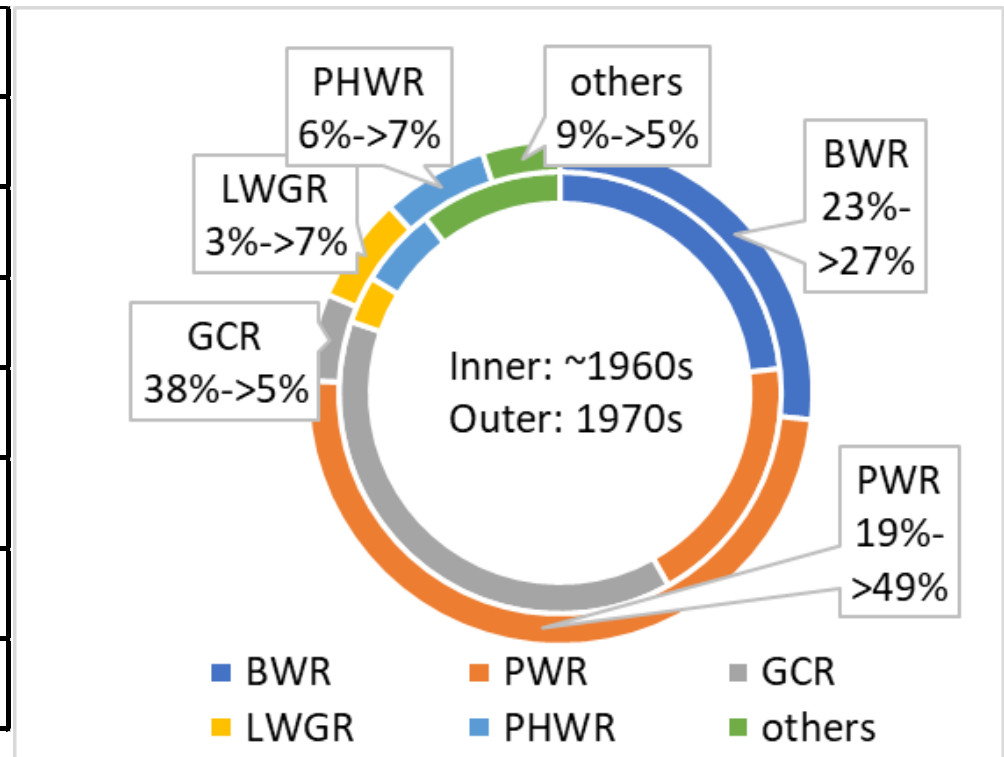
1. 原子力利用の歴史を振り返る

(2) 1960年代の“炉型スイッチング”

- 1960年代前半までは各国で様々な炉型が導入されたが、1960年代後半以降は軽水炉が主流に。
- 1970年代以降もカナダは重水炉（CANDU）、英国はガス炉（GCR）、ロシアは黒鉛減速炉（LWGR）導入を継続。

世界の1970年代までの導入炉型

	~1960s	1970s
BWR	20	43
PWR	16	79
GCR	33	9
LWGR	3	11
PHWR	5	11
others	9	8
	86	161

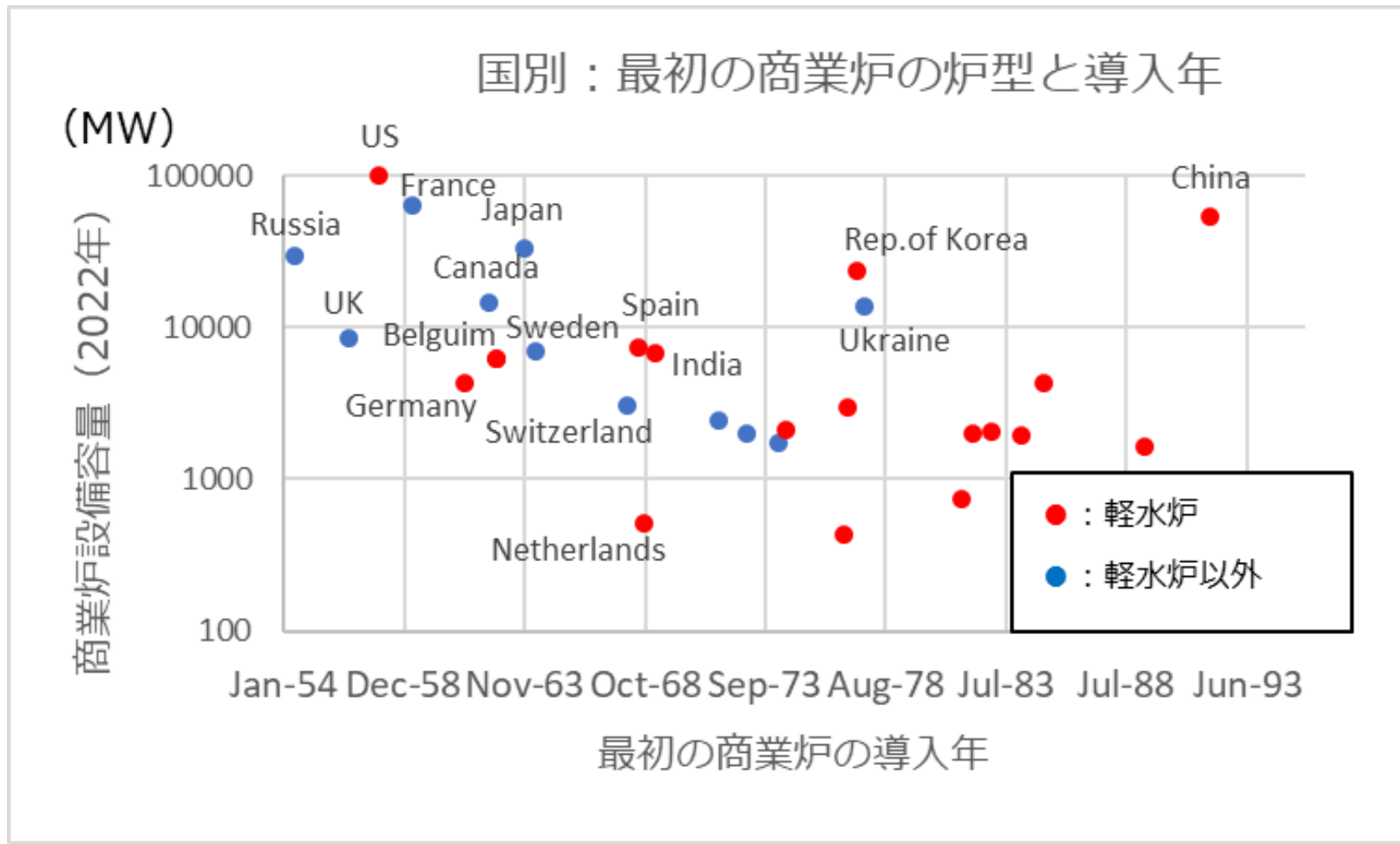


出所) IAEA, Power Reactor Information System (PRIS) より作成
<https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>

1. 原子力利用の歴史を振り返る

(2) 1960年代の“炉型スイッチング”

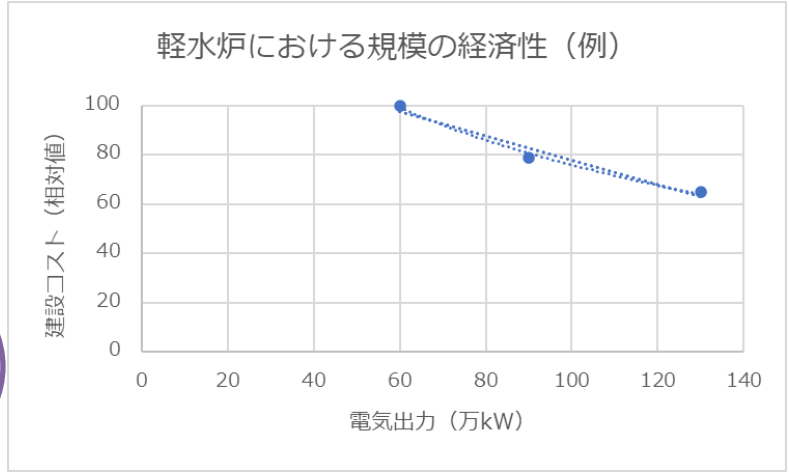
- 1960年代後半より、米国から世界に普及する炉は軽水炉に。
- 何が起きた？ どうして軽水炉が選ばれた？



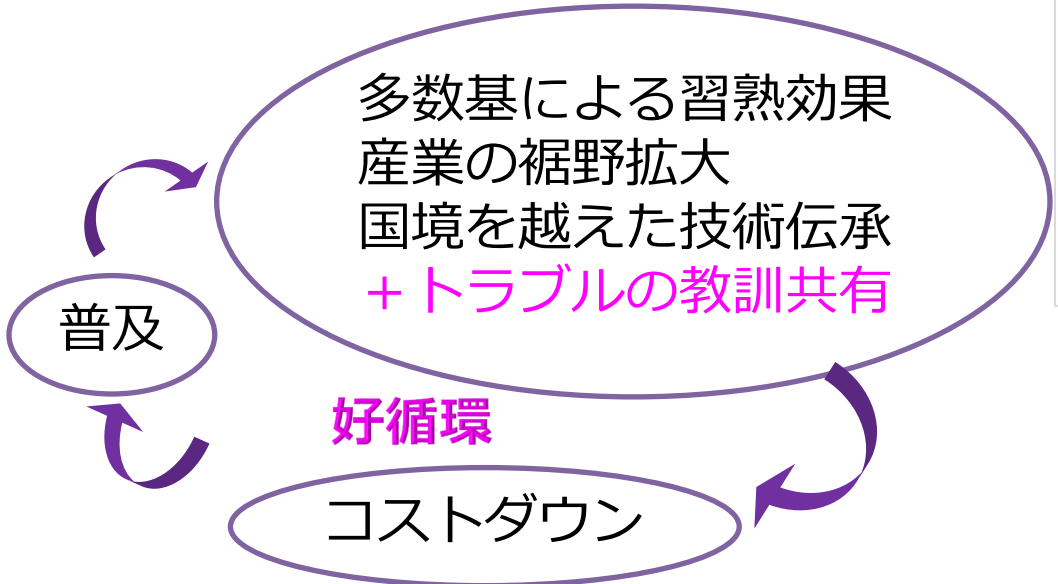
1. 原子力利用の歴史を振り返る

(3) 軽水炉が普及した技術的理由 (推測)

1. ウラン濃縮技術のイノベーション：遠心分離法の商業化
 - ◆ 天然ウランでなく濃縮ウランを使い、軽水減速+冷却が可能に。
 - ◆ 最初に軽水炉を商用化した米国から技術導入した国は、最初から軽水炉 (ex. 韓国、台湾、・・・)
2. 設計の単純性・材料の汎用性：火力発電や他産業の経験も反映可能
 - ◆ 黒鉛減速材も液体ナトリウムも不要→構造がシンプルに
→初めて軽水炉を導入する国でも、火力発電程度のインフラ技術でOK (の可能性が高い)
3. スケールメリット：
古典的なコストダウンの方法



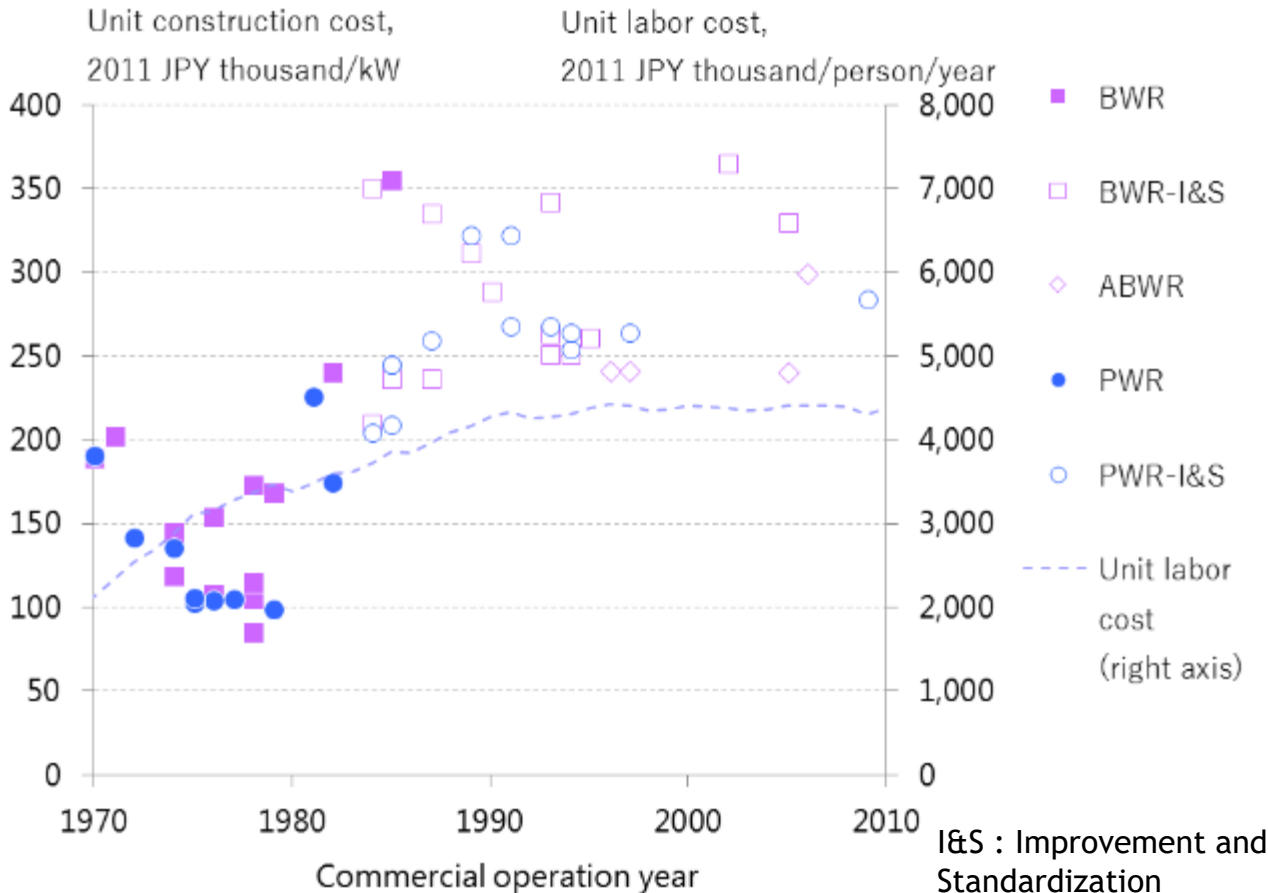
出所) OECD/NEA, *Reduction of Capital Costs of Nuclear Power Plants*, 2000



1. 原子力利用の歴史を振り返る

(参考) 日本のプラントの建設コスト実績

- 日本の軽水炉建設コスト単価は1980年代以降若干上昇したが、それでも40万円/kW未満←OECD諸国内では他に類を見ない実績！



Overnight unit construction cost in Japan

Source: Y. Matsuo and H. Nei, 2018, "Assessing the historical trend of nuclear power plant construction costs in Japan", IEEJ website <https://eneken.ieej.or.jp/data/7922.pdf>

1. 原子力利用の歴史を振り返る

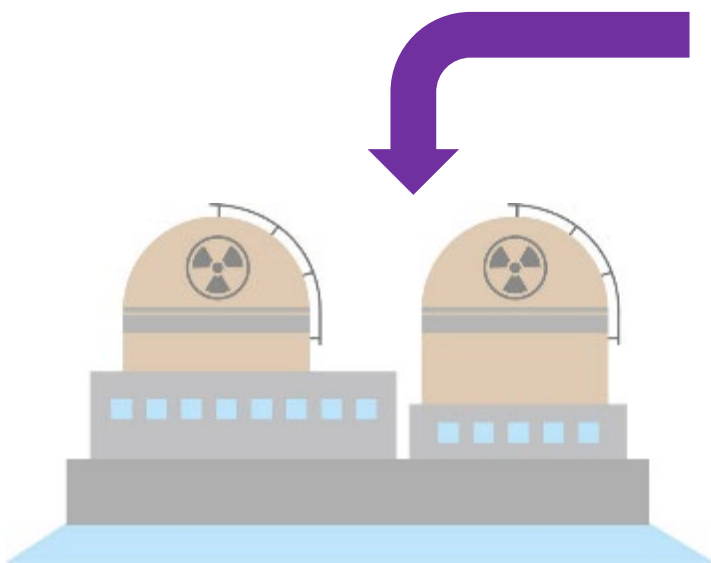
(4) なぜ軽水炉でスケールメリット？

- スケールメリットは多くの産業に見られる一般則であるが、**軽水炉がその例外とならなかつた要因の分析**は重要。

仮説

水 * ステンレス = 汎用的な素材から成る構造物

- 新興国を含む多くの国で事業者が短期間で製造技術を会得
- 同じ設計のプラントを同時期に多方面に展開可能
- 火力発電や他産業から材料・熱流動特性・構造健全性の知見を取得



・・・近年、エロージョンシールド板にクラックが発生し、（タービン）翼母材まで進展するケースが見られ、とくにNSS運用機に多発傾向にある。このクラックの発生原因は、応力腐食割れと言われている。ステライト板自体が、応力腐食割れの感受性の強い材料である上に、エロージョンシールド板の付近にステライト友材で溶接付しているため、・・・応力腐食割れを起こし、クラックに至るものと考えられている。

「ターボ機械」第6巻第9号、1978年5月
火力発電所におけるターボ機械のトラブル
川本昌久、中部電力武豊火力発電所

2. 大型 vs 小型 (モジュール)

(1) 大型軽水炉の課題と「小型化」の発想

大型軽水炉の課題 (とされるもの)		SMR開発者の主張する利点
物量が多く工数もかかり、建設工期が長期化し資金負担が大きい。 国にもよるが・・・	⇒	部品を工場で大規模生産し現地で組み立てる「モジュール化」により、工数削減・建設費抑制につながる。
適地が限られ、大需要地までの送電線も長大化。	⇒	需要に応じた小出力にでき、分散型電源として立地可能。
大型炉心で燃料も多く、事故時の冷却・閉じ込めに課題。	⇒	コンパクトな炉心であり、事故時の冷却や閉じ込めが比較的容易。

大型軽水炉では不可能と誰が決めた？

- + SMRならではの付加価値(?)
- 【安全性】 固有安全性/受動的安全性
- 【経済性】 “数(量)”の経済性*
- 【利便性】 多目的利用

(*) Source:
Tony Roulstone, "Economies of scale vs. economies of volume", Nuclear Engineering International, 6 August 2015

2. 大型 vs 小型 (モジュール)

(2) SMR : 比較的早期に実現のはずが40年

安全性の向上はもちろんのこと、再生可能エネルギーとの共存や、水素の製造、熱エネルギーの利用といった多様なニーズにこたえる原子力技術のイノベーションが進められています。米国では、あのビル・ゲイツ氏が会社を立ち上げたり、ベンチャー企業が開発に参入したりと、**これまでにない原子力技術への挑戦**が繰り広げられています。また、日本でも、原子力イノベーションに向けた取り組みが進められています。

…代表的なもののひとつが、「**小型モジュール炉**」です。SMR (Small Modular Reactor) と呼ばれ、世界各国で開発が進められています。

出所) 資源エネルギー庁「原子力にいま起こっているイノベーション (前編) ~次世代の原子炉はどんな姿?」
2020/8/20最終更新 https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/smr_01.html

1982年「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」

4. 原子炉の多目的熱利用

…1,000°C程度の高温ガスが得られ幅広い用途が期待される**高温ガス炉**の開発を、国際協力も含め研究開発の効率化を図りつつ積極的に進めること…

…既存の炉として技術的に最も安定している**軽水炉の多目的熱利用**については、**中小型軽水炉**の利用を含め、**条件によっては比較的早期に実現する可能性**があり、所要の調査等を経て**民間主導の下で進められるべきもの**であるが、利用系システムの開発、経済性の問題及び立地に関して国民の理解を得る等の社会的問題があり、これらの問題の克服について国は支援するものとする。

1987年「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」

第4章 先導的プロジェクト等の推進

…高転換軽水炉、**中小型安全炉**、**モジュール型液体金属炉**等の**新しい型の炉**については、基礎的・基盤的研究を段階的に、かつ、幅広く推進し、将来の原子炉技術のブレークスルーの可能性の検討を行うこととする。

40年前からあるのに一度も実用化していない現実をどう見るか。

2. 大型 vs 小型 (モジュール)

(3) "SMRならではの付加価値" の検証

1. 固有安全性/受動的安全性の例

- ◆ 負のフィードバックや物理現象による自動的な炉停止
- ◆ 動的機器を不要とする自然循環のみによる長期炉心冷却 + ヒートシンク確保
- ◆ 燃料が少ないことによる放射性物質拡散量/拡散距離の抑制 → UPZ抑制

その気になれば大型軽水炉に受動的安全機能を付けることも（昔から）可能だった。

そうしなかったのは、**動的安全設備で所定の安全が確保出来たから。**

2. 多目的利用の例

- ◆ 地域熱供給（暖房、温水、・・・）
- ◆ 水素製造

3. "数（量）"の経済性の例（他業界）

- ◆ 太陽光パネル
- ◆ 航空機（型式認定制もあり量産可能に）
- ◆ 他、ほとんどの汎用工業品

これまではそれで済んだが
これからはそうはいかん！



仮説

これらの実現の条件：

顧客目線

Customers' Perspective

3. 顧客目線

(1) 顧客と競合と市場→製品・サービスの仕様

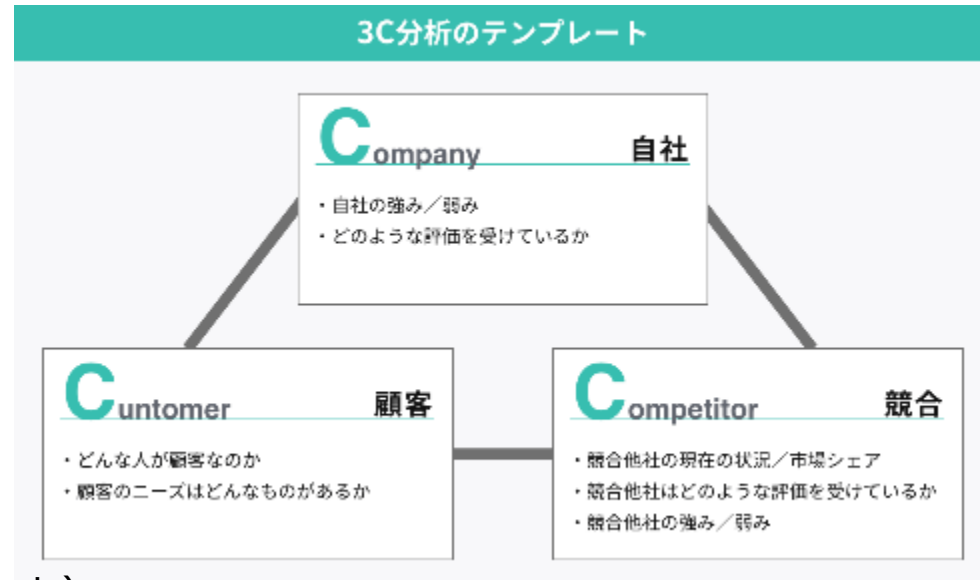
3C分析の目的：

市場や顧客のニーズ（Customer）及び競合（Competitor）の動向を調査し、それらを踏まえて自社が成功できる要因を見つけること。

出所) Ferret, 3C分析とは？競合や市場の分析方法や事例から学び実践してみよう！

<https://ferret-plus.com/curriculums/66>

例) 地域熱供給



Customer

★目的（=顧客が達成したいこと）

- 再生可能エネルギー・未利用エネルギーの活用による**温暖化ガス排出量削減**
- 余剰スペースの有効活用/災害時の電力・熱・水の供給継続による**強靱化**
- 最適なエネルギーマネジメント/大規模な電力の需給調整機能による**付加価値向上 + 省エネ**

出所) (一社) 日本熱供給事業協会> 地域熱供給(地域冷暖房)のメリット

★導入事例：大阪市北区中之島二・三丁目（関電エネルギーソリューション）

- 河川水（温度差熱エネルギー）を利用し、ビル内にヒートポンプや蓄熱槽などの熱供給プラントを設置し、化石燃料を使用しない高効率の熱供給を達成。

Competitor

★競合は？（仮にSMRで熱供給するとして）

- 河川や湖沼などの未利用熱エネルギー
- 化石燃料（ガス、石炭）、バイオマス等

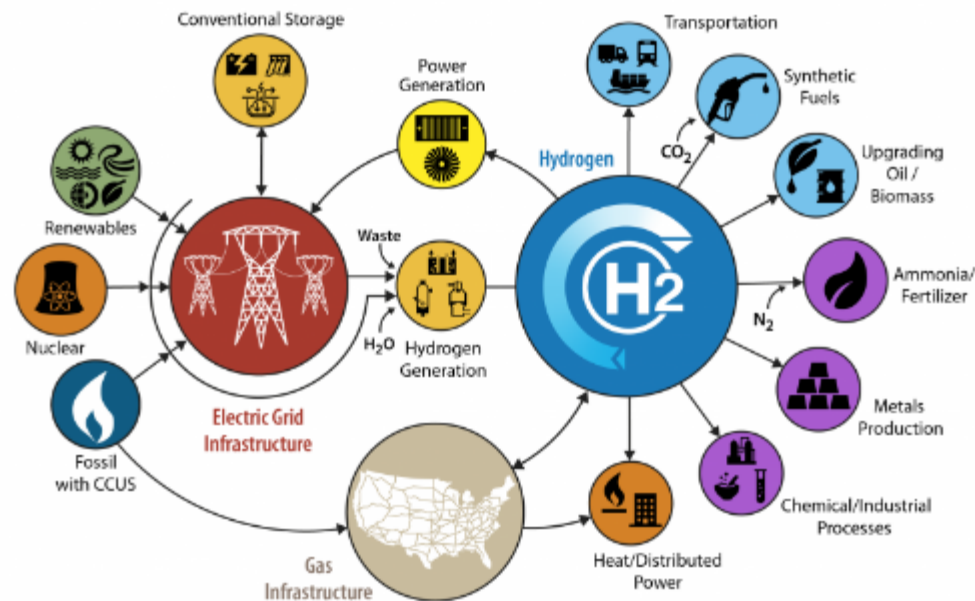
SMR開発者はこのようなことをしてきたか？

3. 顧客目線

(2) 原子力の多目的利用実績事例：水素製造

	国	名称	説明
計画	ポーランド	シフィエルク	化学プラント用のプロセス熱、水素製造
	日本	HTTR	2030年頃までに超高温炉で3ドル/kg以下の水素製造を目指す
	アメリカ	プレーリーアイランド	高温蒸気電解による水素製造
		デービスベッセ	低温電気分解による水素製造
		ナインマイルポイント	低温電気分解による水素製造（*）
		パロベルデ	低温電気分解による水素製造（*）

(*)H2@scaleプログラム
 水素を適正なコストで製造・輸送・貯留・活用できることを証明するため、DOEのエネルギー効率・再生可能エネルギー局（EERE）、水素・燃料電池技術室（HFTO）が複数の産業部門で進めているプログラム。
 パロベルデ発電所（アリゾナ州フェニックス）ではPNW Hydrogen LLC社が中心となり、ゼロエミッション電力の材料としてクリーン水素を役立てるとともに、原子力発電所で電力以外の重要な経済産物を生み出せることを実証するのが目的である。クリーン水素の製造コストを10年以内に現時点の5ドル/kgから1ドル/kgまで引き下げるのが目標。



出所) DOE

<https://www.energy.gov/articles/doe-announces-20-million-produce-clean-hydrogen-nuclear-power>

<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/h2scale>

3. 顧客目線

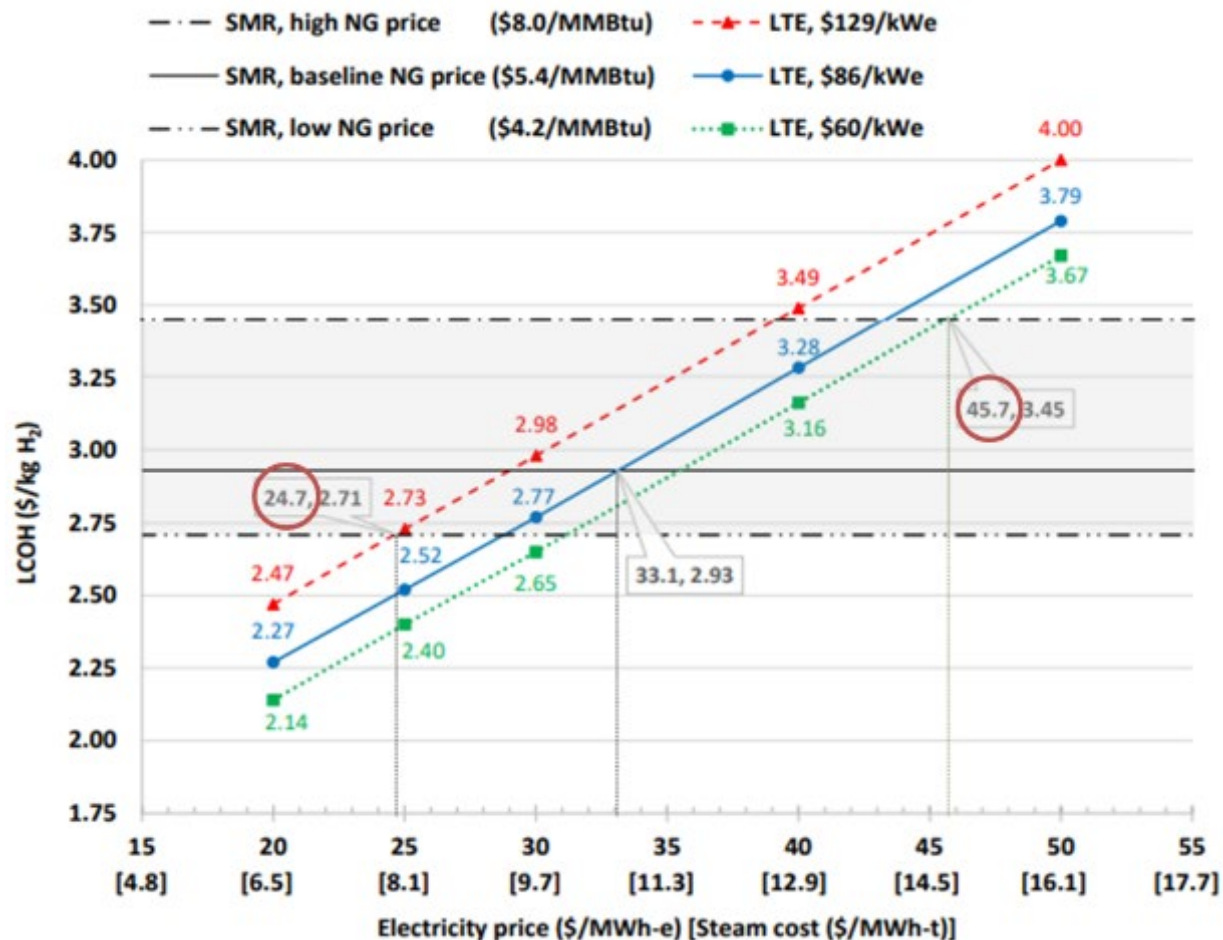
(3) 多目的利用の適用性評価例：水素製造

● 米国のH2@scaleプロジェクトにおける経済性検討

天然ガスが高く電解装置が安い最良シナリオでは、電力価格が45.7ドル/MWhのときに従来の水素製造方法であるSMR(蒸気メタン改質)と同等の経済性となる。
 逆の最悪シナリオでは、電力価格は24.7ドル/MWhを下回らないと経済的に劣後する。

2018年の米国での軽水炉による発電のコストは約30~40ドル/MWhとされている。

原子力利用の水素製造の事業成立性は、天然ガス価格と電解装置の製造単価に依存する。



出所) INL, Light Water Reactor Sustainability Program / Evaluation of Non-electric Market Options for a Light-water Reactor in the Midwest, 2019.

3. 顧客目線

(参考) 米国の小型炉の開発・運用実績

- 1954年より1977年まで米国陸軍による Army Nuclear Power Programにおいて、0.1～40MWの運搬可能な小型原子炉開発・運用を実施。
- 1957年、バージニア州Ft. Belvoirにおいて実証機が完成。その後約20年にわたり更に7基を米国内外で製作・運転。

出所) "Army Nuclear Power Program, 1954-1976"
US Army Corps of Engineers



- 2019年、米国防衛省（DOD）は緊急時に運搬可能なSMR提案“Project Pele”として募集開始。1～10MW程度の出力を最低3年継続できること・重量40トン未満などの厳しい制約がある。
- 2022年6月、BWX Technologiesが同プログラムにおける試作機製造を3億ドルでDODと契約。
試作機は2024年、アイダホ国立研究所に納入予定。

出所) World Nuclear Association, "Small Nuclear Power Reactors"、BWXT news release 9 June 2022
BWX Technologies, "BWXT to Build First Advanced Microreactor in United States" 9 June 2022

まさに
顧客目線

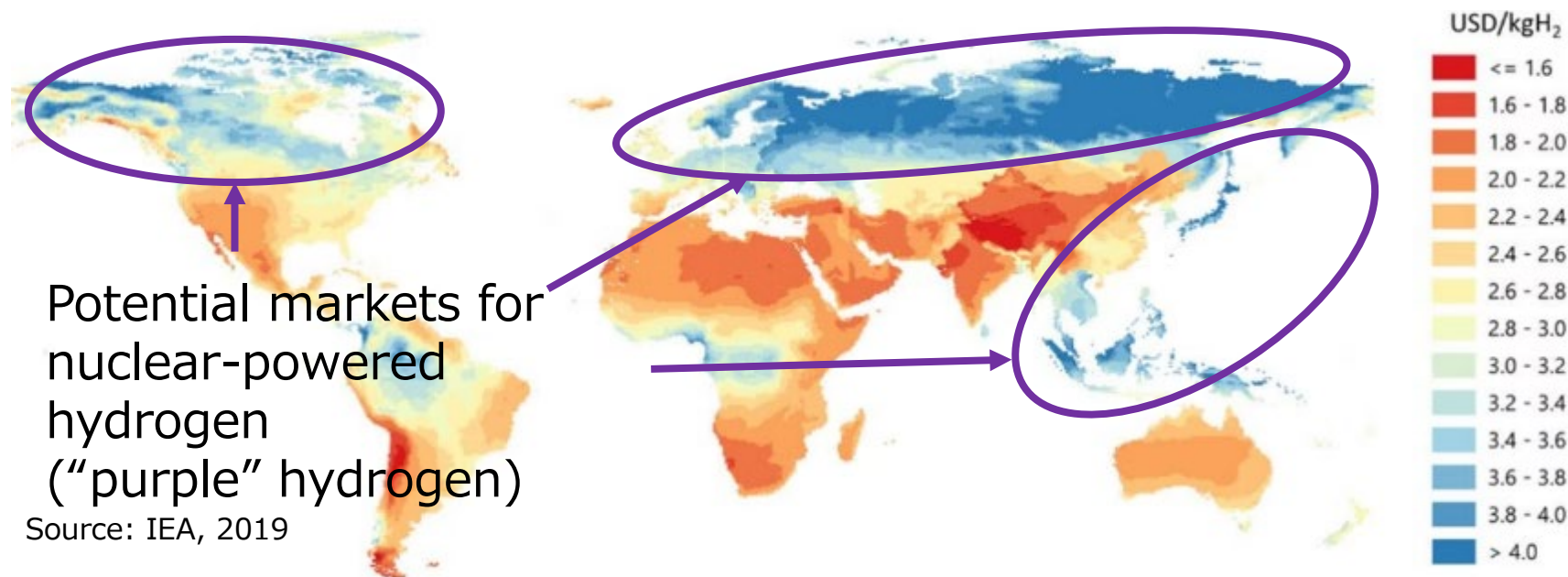
SMRを大容量電力供給より、災害時などの緊急時用途に適用

3. 顧客目線

(3) 水素製造の3C分析

Areas	Customers (Markets)	Competitors
Transportation	Vehicles, Ships, Aircrafts, Fuel cells	Fuel oil/hybrid vehicles
Generation	Electric utilities, Small IPPs, Storages for renewables	Fossil fires, Small gas turbine generators, Batteries
Industry	Oil refining, Steel production	Current heat suppliers Chemical goods producers

Hydrogen costs from hybrid solar PV and onshore wind systems in the long run



4. 実用化の要件

(1) 各炉型の開発方針

- 「革新炉のロードマップ」による各炉型の開発方針は以下の通り。

出所) カーボンニュートラルやエネルギー安全保障の実現に向けた革新炉開発の技術ロードマップ(骨子案)、2022年8月9日原子力小委員会資料 P18

炉型	開発方針
革新軽水炉	足元で我が国が強みとする軽水炉サプライチェーンを繋ぎ、規制の予見性が高く実現時期が見通せ、革新的安全性向上を図る 革新軽水炉の開発を最優先 に取り組む。
小型軽水炉	同時に、安全保障の観点から国際協力貢献とサプライチェーンの事業機会獲得の支援を行いつつ、米欧において2030年前後に運転開始を目指す先行プロジェクトの状況を踏まえながら、投資リスク低減や分散電源等の 将来ニーズを念頭に置いたオプション確保 のため、小型軽水炉の開発に取り組む。
高速炉	高速炉技術を活用することによって、既存の軽水炉を含めた原子力技術が 資源循環性を獲得 することを可能とする。21世紀半ば頃に高速炉の運転開始を期待するとして高速炉開発会議・戦略ワーキンググループにおける議論も踏まえ、開発炉型を具体化していく。「常陽」「もんじゅ」の経験を強みとして最大限活用し、国際連携も推進。
高温ガス炉	産業の脱炭素のために カーボンフリーの電力・熱・水素をコジェネレーション することを念頭に、国際連携の可能性も追及しながら、高温ガス炉の開発を推進。試験炉「HTTR」を活用して熱利用・水素実証も推進。
核融合	核融合エネルギーの実現に向け、国際協力が進められているITER計画や幅広いアプローチ活動等(原型炉に向けた設計活動)を通じて、核融合発電に必須となる基幹技術を着実に推進。

4. 実用化の要件

(2) 各炉型のポートフォリオ（抜粋）

- 既存軽水炉の技術と基準を適用可能な革新（大型）軽水炉に期待
- 水素製造などの多目的利用も視野に **+顧客目線が必須**

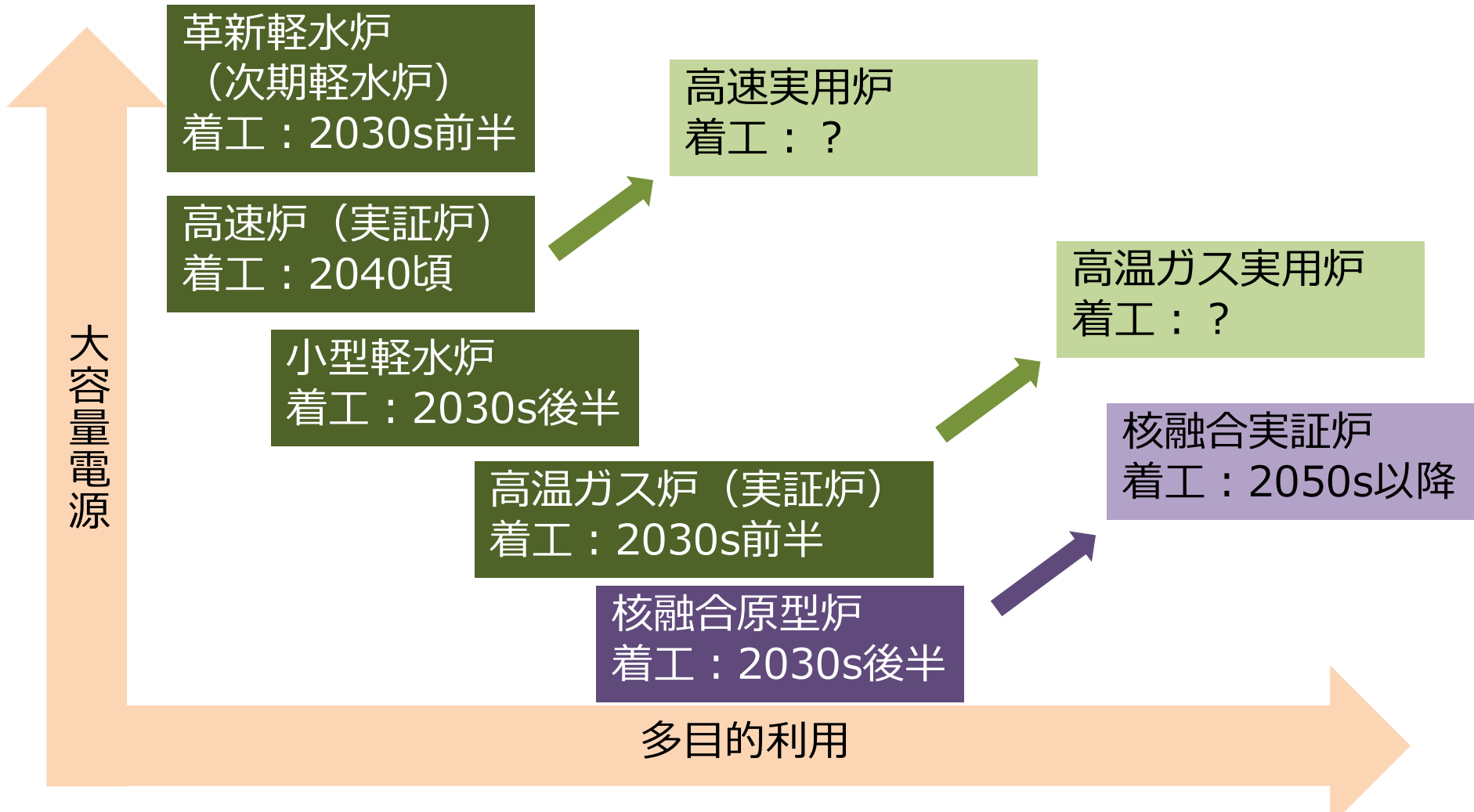
	技術成熟度・時間軸	規制適合性	サプライチェーン	経済性	水素製造
革新軽水炉	◎	◎	◎	◎	△
小型軽水炉 (国内)	○	△ * 基準整備が必要	○~◎	?	△
高速炉	○	○	◎ * 常陽・もんじゅ実績	◎	○
高温ガス炉	○	○	◎ * HTTRの実績	○→◎ * コジエネ	◎
核融合炉	×	△	○ * ITERの実績	?	◎

出所) 9/22 第31回原子力小委員会資料4 原子力政策に関する今後の検討事項について
 P48 2050年CNに向けた革新炉開発のポートフォリオ（ラフイメージ） 2022/7/1第4回革新炉WG資料3より
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/pdf/031_04_00.pdf

4. 実用化の要件

(3) 各炉型の位置づけマッピング

小型軽水炉の位置づけは？



出所) カーボンニュートラルやエネルギー安全保障の実現に向けた革新炉開発の技術ロードマップ (骨子案)
 2022年8月9日原子力小委員会資料 より作成

4. 実用化の要件

(4) 批判に耳を傾けましょう (1/2)

革新炉は革新的か？

4

革新炉ワーキンググループ
カーボンニュートラルやエネルギー安全保障の実現に向けた革新炉開発の技術ロードマップ(骨子案)抜粋

2.2. レジリエンス・セキュリティリスクへの対応

炉型革新による革新的安全性

- 革新炉による炉型革新によって、より合理的に地震や津波等の自然災害、航空機衝突といった外部ハザードへの対応強化が可能。自然循環や圧力差による冷却を含め自然法則を安全機能に採用した受動的な安全炉の開発・導入が、東京電力福島第一原子力発電所事故後も進展。
- 革新軽水炉では、上記のような更なる安全性向上対策に加え、重大事故時も環境影響を防ぐコアキャッチャーや、放射性希ガスの分離・貯留設備等の緊急時の避難や土地汚染を防止する対策も可能。小型軽水炉では、設計のシンプル化で事故確率の大幅な低減を目指す。炉心熔融が基本的に発生しない高温ガス炉、自然に止める・冷える・閉じ込める機能を目指すナトリウム冷却高速炉は、実機経験を我が国が豊富に持ち、優れた安全性を持つ。
- 略

水素製造や熱貯蔵、分散型電源等による系統の柔軟性・レジリエンス確保

- 略
- 革新軽水炉や小型軽水炉、高速炉、高温ガス炉等は、制御棒の組成の工夫、系統の電力需要に応じた水素製造や熱貯蔵、モジュールの個別の起動・停止等により負荷追従が可能となり、系統全体の柔軟性の向上にも貢献し得る。
- 略
- 小型分散型電源としての小型軽水炉やマイクロ炉、系統分離された可搬型電源としての船舶搭載炉等も脱炭素化を進めていくために着目されている。

AP1000、EPR、VVER1000など、多くの原発で導入済みの機能

EPR、VVER1000などで実装済み

1982年原子力長期計画
「中小型軽水炉の利用を含め、条件によっては比較的早期に実現する可能性があり、所要の調査等を経て民間主導の下で進められるべきもの」

負荷追従運転は原発比率の高いフランスなどで導入済みの機能だが、経済性の悪化をもたらす。原発に求められている機能なのか

マイクロ炉、船舶搭載炉など、だれが求めているのか

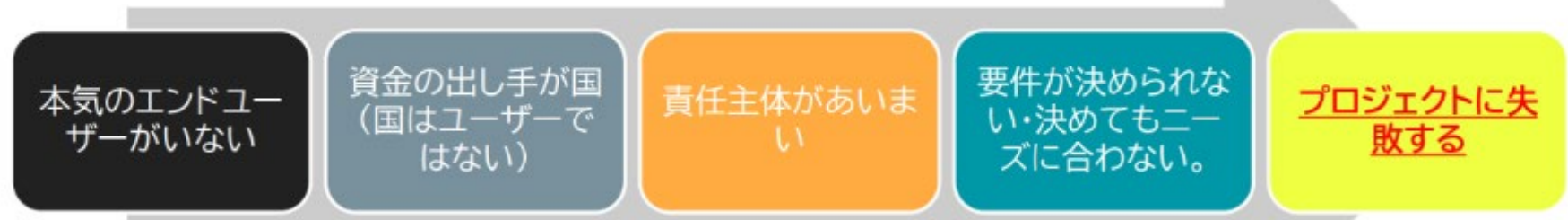
認定特定非営利活動法人
原子力資料情報室
Citizens' Nuclear Information Center



4. 実用化の要件

(4) 批判に耳を傾けましょう (2/2)

革新炉がいつまでたっても“革新炉”としか呼ばれないのは・・・



「革新軽水炉」以外は
司令塔・開発主体の
議論以前の段階

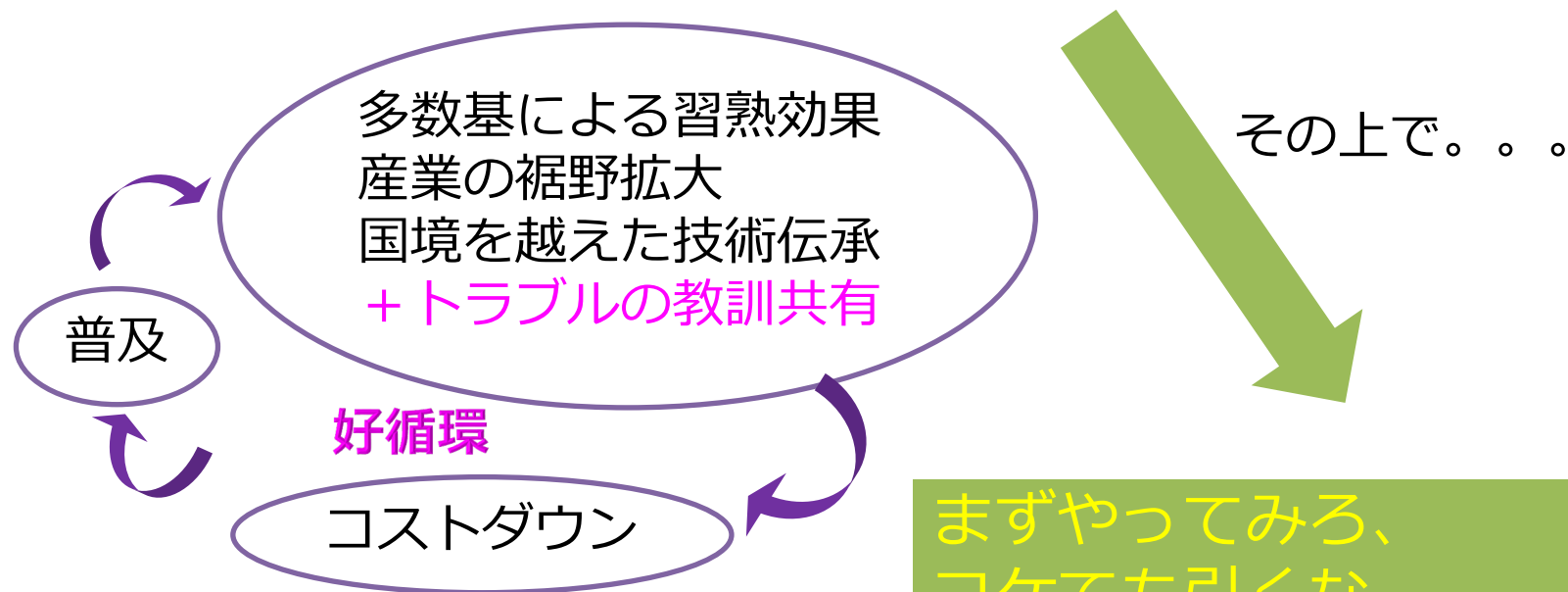


出所) 原子力小委員会への情報提供－原発開発、導入、利用の諸問題について－ 松久保委員、2022年10月13日 第32原子力小委員会資料3

このご指摘 (だけでも) 真摯に耳を傾けませんか？

4. 実用化の要件：まとめ

- 軽水炉の実用化の歴史を振り返る。
→多くの炉型の中、軽水炉は事業者に選択された。
- “その炉型ならではの付加価値”を検証する。
→安全性？ 資源循環性？ 多目的利用？
- 顧客目線を考える。→適用条件、市場、様々
- 開発停滞の現実を直視し、批判に耳を傾ける。



まずやってみる、
コケても引くな、
目指せ2050年の基幹インフラ

(再度) 批判に耳を傾けましょう。

・・・

長計に“SMR”の言葉が初登場したのは1982年（第6回）で、「既存の炉として技術的に最も安定している軽水炉の多目的熱利用については、中小型軽水炉の利用を含め、条件によっては比較的早期に実現する可能性があり（中略）民間主導の下で進められるべきものである」とある。「民間主導の下で進められるべき」と書かれていることから、国はこの時点で既に研究開発段階は過ぎたのだから、あとは市場原理で普及していかろうと考えていたらしいことがうかがえる。

SMRがなぜ今日まで一度も実用化されていないかについては本稿の趣旨から外れるので詳細は省いて、ここでは、以上の事実は取材せずとも簡単な文献調査で分かることであるにもかかわらず、ディベロッパーの発表をそのまま報道するのみで批判的な視点を加えようとしめないメディアの姿勢を問題視したい。良いことづくめの説明にどこか不安を覚えるのは人間の本能だろうに、そこには触れたくない余り、黒歴史からも目を背けるのであろうか。・・・

出所) 2021年1月「エネルギーレビュー」特集、“原子力界からみてマスコミは変わったのか” 村上朋子



Thank you for your attention
Merci pour votre attention
Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit
Tack för er uppmärksamhet

Photo : 釜石広域ウィンドファーム (岩手県釜石市)
2020/9/19