



日本原子力学会 新型炉部会セッション

社会動向を踏まえた新型炉開発の価値
(1) エネルギー安全保障・廃棄物問題解決等
へ貢献できる新型炉開発の価値と課題

2022年9月8日

東京都市大学
高木 直行



目次

- ◆はじめに
- ◆原子力発電の短中期的計画
- ◆エネルギー安全保障確保と革新炉
- ◆廃棄物負荷軽減への革新炉ポテンシャル
- ◆おわりに



エネルギーを取り巻く世界の状況

◆ IEA-COP26ネットゼロサミット(2022年3月)で支持された7原則

ネットゼロ(温室効果ガス純排出ゼロ)の実現に向けた7原則

1. ネットゼロに向けた持続可能な復興の推進
2. 2030年以降に向けた実行可能なロードマップの策定
3. 各国間の情報共有によるトランジションの促進
4. セクターごとの脱炭素化とイノベーションの加速
5. 官民による投資促進
6. 人々を中心としたトランジションの支援
7. 持続可能・経済的なネットゼロエネルギーシステム

◆ 2022年2月、ロシアによるウクライナ侵攻勃発

- ✓ 世界規模でエネルギー安定供給への不安や物価高をもたらし、資源調達やエネルギーシステムの在り方について、全体的見直しを迫る状況



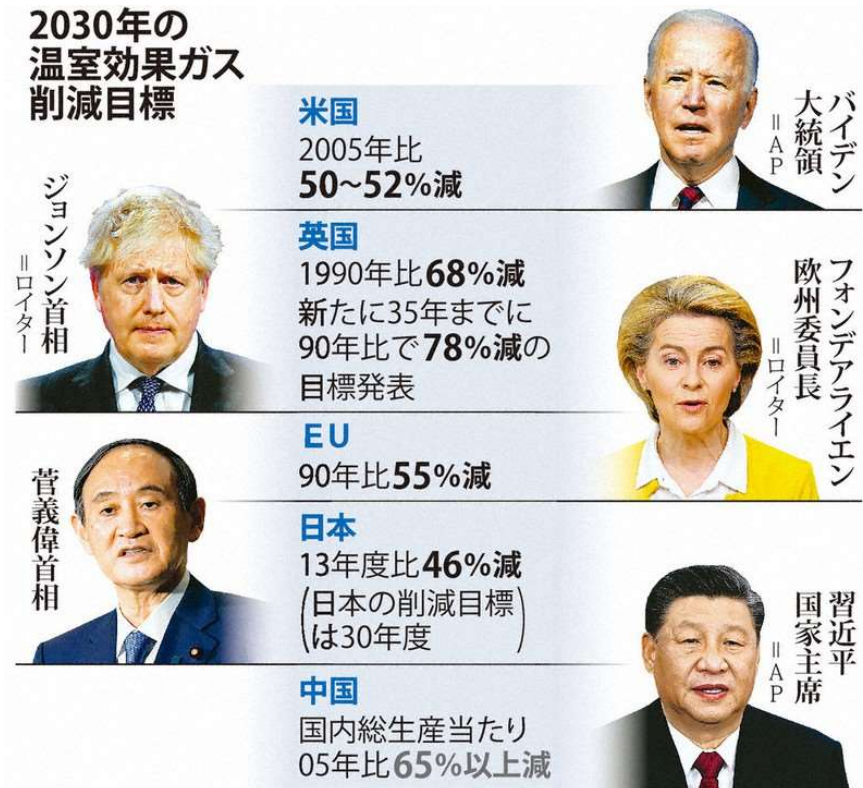
エネルギーを取り巻く日本の状況

2050年に「カーボンニュートラル」を目指す日本政府は気候サミット(米主催、2021年4月)にて、

- ◆ CN政策と整合的でありかつ野心的な目標として、2030年度に温室効果ガスを2013年度から46%削減
- ◆ さらに50%の高みに向け挑戦を続ける

ことを表明。

2030年の温室効果ガス削減目標





岸田総理のエネルギー政策方針

首相官邸での記者会見(2022年7月14日)

- ◆ 萩生田経済産業大臣に対し、最大9基の原発の稼働を進め日本全体の電力消費量のおよそ1割に相当する電力を確保することを指示

GX実行会議(2022年8月24日)

- ◆ 「第1回会議で次世代革新炉の開発・建設など政治判断を必要とする項目が示された。あらゆる方策について年末に具体的な結論を出せるよう検討を加速を」
- ◆ 「原発の再稼働とその先の展開策などの具体的な方策について、政治の決断が求められる項目を明確に示してもらいたい」



革新炉ワーキンググループ

- ◆ 経済産業省資源エネルギー庁は2022年4月、原子力発電の新たな社会的価値を再定義し、我が国の炉型開発に係る道筋を示すため、総合エネルギー調査会電力・ガス事業分科会 原子力小委員会の下に「革新炉ワーキンググループ」(以下、革新炉WG)を設置



[ホーム](#) ▶ [審議会・研究会](#) ▶ [総合資源エネルギー調査会](#) ▶ [電力・ガス事業分科会](#) ▶ [原子力小委員会](#) ▶ [革新炉ワーキンググループ](#)

革新炉ワーキンググループ

[▶ 2022年7月29日 第4回](#)

[▶ 2022年7月1日 第3回](#)

[▶ 2022年5月19日 第2回](#)

[▶ 2022年4月20日 第1回](#)

革新炉WGで整理された5炉型とその特徴

表2. 革新炉開発のポートフォリオ

	技術成熟度・時間軸	規制対応	サプライチェーン	市場性					非エネ分野
				経済性	水素製造	負荷追従	資源の有効利用	廃棄物有害度低減	
革新軽水炉	◎ ※既存技術を活用可	◎ ※既存規制を活用可	◎ ※既存軽水炉のサプライチェーン有	◎ ※現行の軽水炉と同水準	△	○	△	△	○
小型軽水炉	海外	○	○~◎ ※日本が得意とする大型鍛造品が不要のケースも	◎ ※米国のガス火力並が目標	△	○ ※モジュールごとの制御により負荷追従可能なものも	△	△	○
	国内	○	△ ※基準の議論が必要	○~◎	?				
高速炉	○	○	◎ ※常陽、もんじゅの実績	◎ ※現行の軽水炉と同水準	○	◎ ※熔融塩の蓄熱システムを組み合わせた負荷追従可能	◎ ※Pu・MA燃焼可	◎ ※医療用RI製造可	
高温ガス炉	○	○	◎ ※HTTRの実績	○⇒◎ ※コジェネで経済性向上	◎ ※高温を活用した水素製造可	◎	△ ※高燃焼度で処分場面積低減(○)	○ ※耐高温材料製造技術の獲得	
核融合炉	× ※要素技術の開発段階	△	○ ※ITERで部分参加	?	◎	?	◎ ※高レベル放射性廃棄物発生せず	○ ※コイルがヒックス粒子発見に貢献	

第4回革新炉WG(20220729)【資料3】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)



革新炉の種類と特徴

核エネルギー(核分裂/核融合)の活用

反応	核“分裂” (燃料(ウラン/プルトニウム)核分裂)			核“融合” (重水素、三重水素核融合)
	SMR	高温ガス炉	高速炉	核融合炉
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 装置小型化でメルトダウンリスク低減/建設容易/汚染物質少 基本原理は軽水炉。冷却材に水を使用 	<ul style="list-style-type: none"> 炉心の構成材料と冷却材(ヘリウムガス)の特性で高い安全性を実現 発電とともに、高温ガスで水素を製造 	<ul style="list-style-type: none"> 高速の中性子を利用した原子炉。冷却材としてナトリウムを使用 核燃料の再利用が可能。あわせて、核廃棄物の減容化・有害度を低減 	<ul style="list-style-type: none"> 核融合反応による発電 トラブルにより反応は即停止 高レベル放射性廃棄物は発生せず(低レベルの放射性廃棄物のみ)
開発状況	日本:2040年頃から実証炉運転開始 米国:2028年に実証炉運転開始 中国:2026年実証炉運転開始 ロシア:2028年に商用SMR完工	日本:2030年半ば頃から実証炉運転開始 ※2050年に水素製造コスト12円/Nm ³ の可能性	日本:2040年半ば頃から実証炉運転開始 中国:実証炉建設中、2023年運転開始 ロシア:2015年実証炉運転開始	国際プロジェクトITER →2025年実験炉運転開始
安全基準	・軽水炉と同じ安全基準がベース		・高速炉向けの安全基準(燃料、冷却材等)	・核分裂とは異なる原理。設計等の技術は全く異なる ・新たな安全基準が必要(核分裂よりハードルは低い)

第2回GX実行会議 資料5 経団連会長・十倉雅和氏 2022年8月24日

2

8/31「革新軽水炉、コストに強み」経産省審議会の高木教授 - 日経GX (nikkei.com)

次世代原発の種類と特徴	技術成熟度	ルール整備	日本のノウハウ	コスト	関連する主な日本企業
革新軽水炉 既存技術をベースに重大事故リスクを抑制	◎	◎	◎	◎	日立製作所、三菱重工業、東芝が研究
小型モジュール炉 出力30万kW以下。工期が短く事業費も少ない	海外◎	◎	◎	◎	日立がカナダでGEと受注。日揮やIHIが米プロジェクトに参加
高温ガス炉 エネルギー効率が高い。メルトダウンが起きない	○	○	◎	◎	日立、三菱重工、東芝、IHIが研究
高速炉 高速の中性子により高効率で核燃料を燃やす	○	○	◎	◎	「常陽」「もんじゅ」に日立、三菱重工、東芝が参加
核融合炉 水素原子が核融合する際のエネルギーを利用	×	△	○	?	京大発スタートアップも

(注)経済産業省「革新炉開発の技術ロードマップ(骨子案)」などを基に作成

主な次世代原発の特徴と課題

	主な特徴	課題	実用化のめど
革新軽水炉	既存技術をもとに安全性・経済性を向上	建設期間に10年近くかかり、初期費用がかさむ	日本では30年代
小型モジュール炉	出力30万キロワット以下。工期が短く初期費用を低減	発電容量が小さく発電コストがかかる見込み	米欧では20年代後半
高温ガス炉	メルトダウンが起きない構造。水素量産も可能	軽水炉に比べ発電効率が落ちる	40年代以降
高速炉	使用済み核燃料を使い発電の効率が低い。核のごみを低減	日本では「もんじゅ」が16年に廃炉。安全運転の難易度が高い	40年代以降
核融合炉	水素などの原子核同士が融合し、太陽内部で起きるエネルギー反応を再現	技術開発は実験段階	50年代以降



目次

◆はじめに

✓◆原子力発電の短中期的計画の

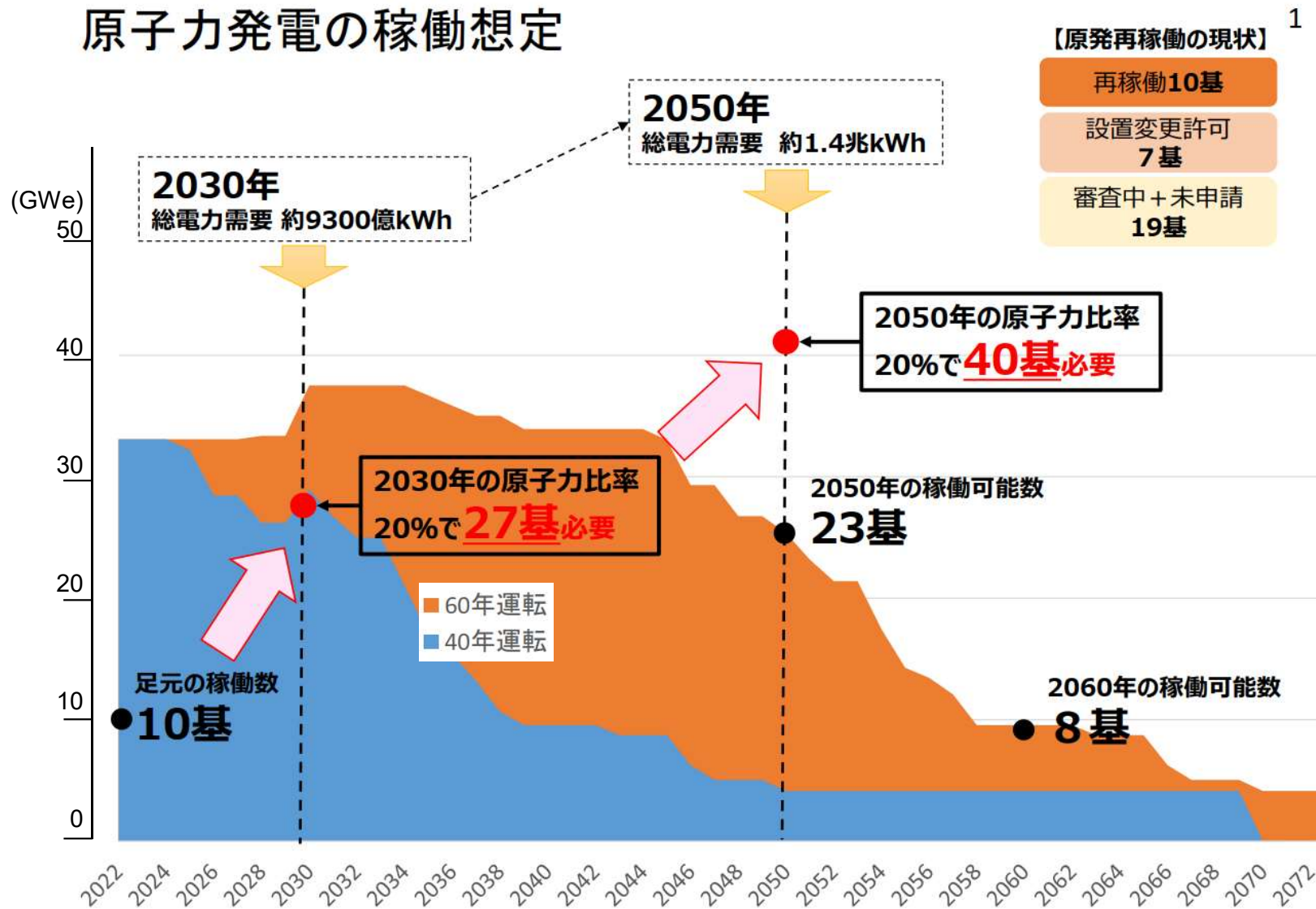
◆エネルギー安全保障確保と革新炉

◆廃棄物負荷軽減への革新炉ポテンシャル

◆おわりに

原子力設備容量とCN達成見通し

原子力発電の稼働想定

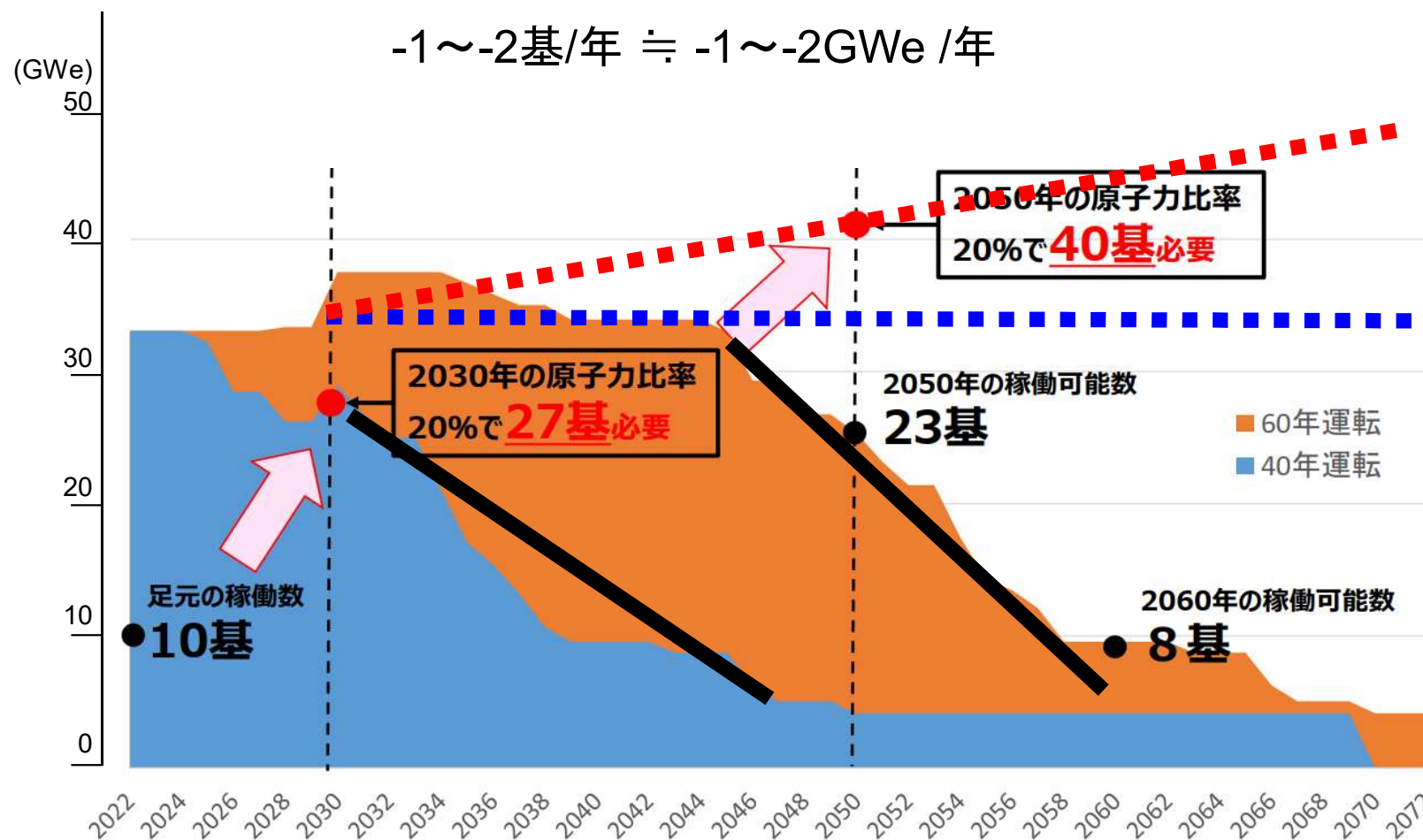


- 稼働率を80%とすると、2030年時点で必要な原子力発電容量は約27～30GWe
- 2030年時点での原子力容量は27GWe → 45%削減目標達成は辛うじて可能そう
- しかし、直ぐさま寿命を迎えた炉の退役により達成不可能に
- 2050年の正味ゼロ目標については、例え全基を60年運転としても削減目標の達成が見通せない状況

CN達成に必要な設備増強速度

- 設備容量減少速度:

-1~-2基/年 ≒ -1~-2GWe /年



維持だけでも
+1~+2GWe /年



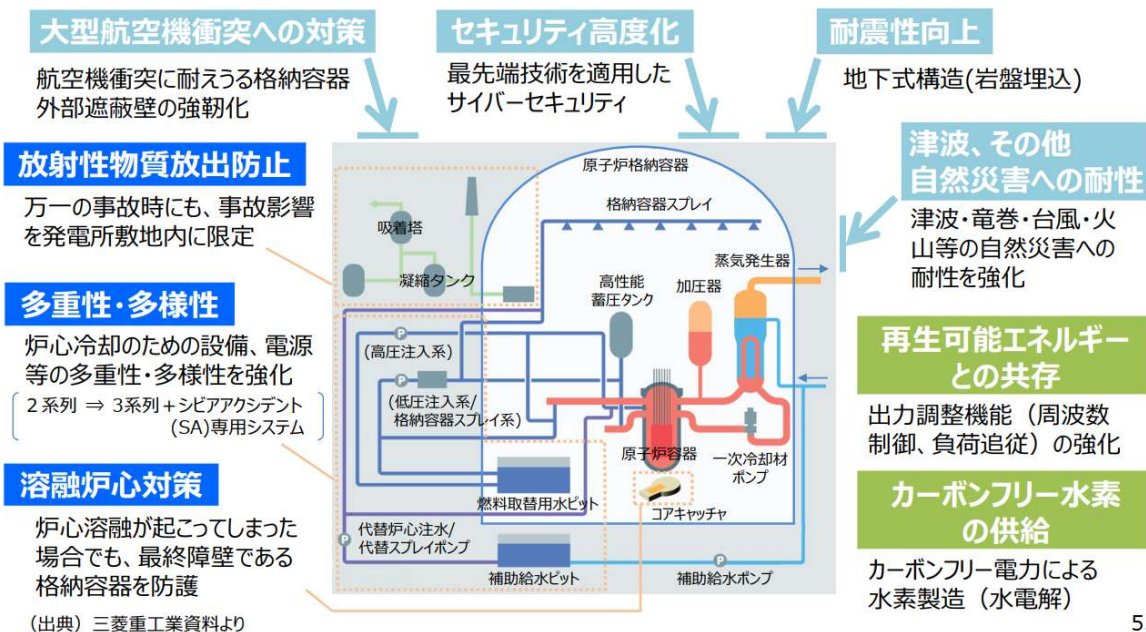
革新炉導入でCN達成は可能？

◆そもそも「革新炉」とは何？

□近年話題のSMRが中心と思われがち

□安全性と経済性を高めた大型軽水炉「革新軽水炉」

2030年時点の設備量をNuScale炉(77MWe)で2050年まで維持するとしたら260モジュールもの導入が必要



仏の方針:

既存炉の運転延長、EPR2を14基建設(23GW)、SMR導入(4GW)を組み合わせるシナリオが、経済面で最も優位と結論。

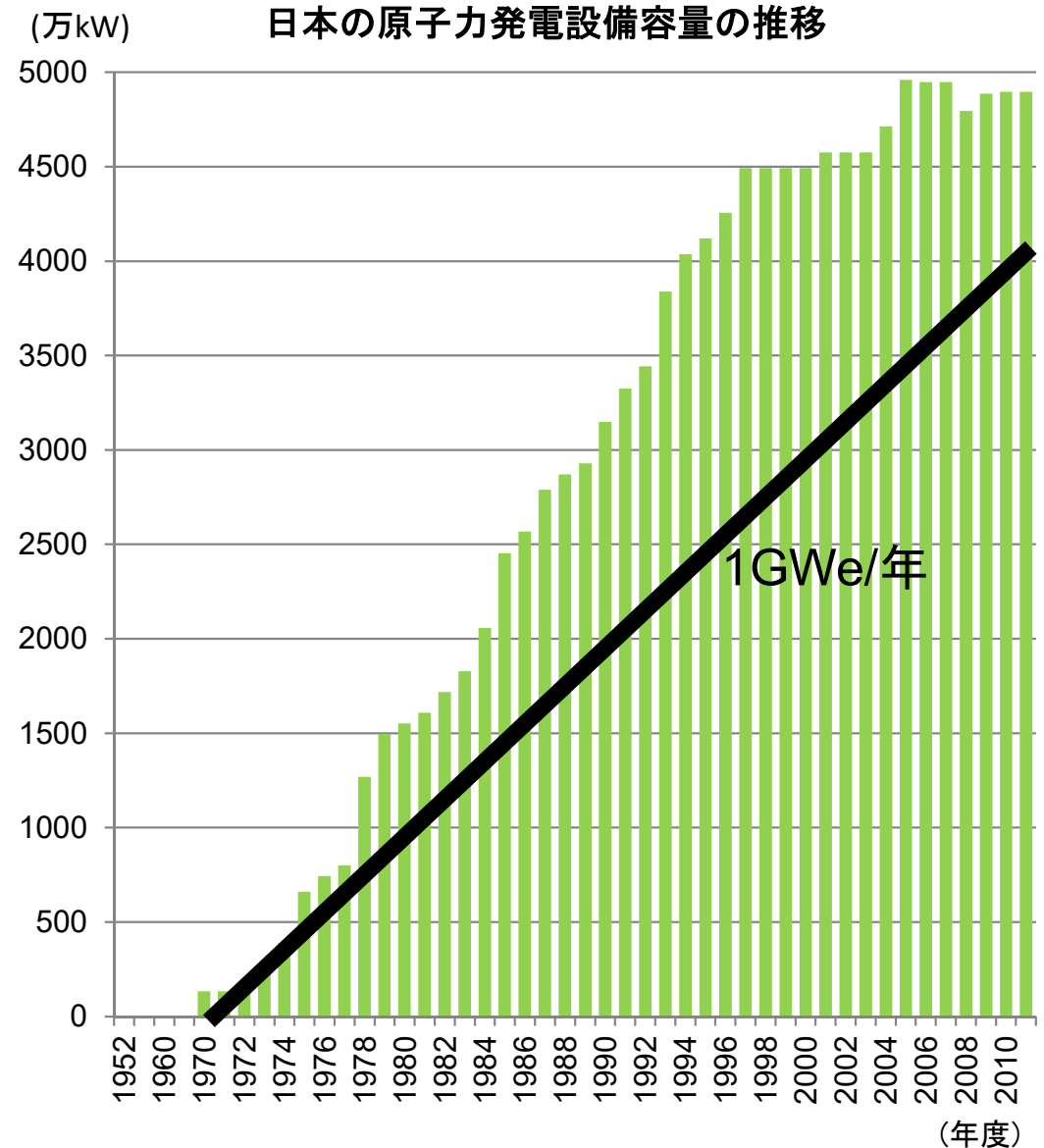
再エネ：原発 = 50 : 50で、
2050年CN未達リスクを軽減：

- 未発達のSMR産業は必ずしも必要ではないが、EPR2の建設速度を緩和させる機会。
- 30年間で14基のEPR2を建設するのは産業基盤に大きな挑戦であり、過小評価すべきではない。



CNを達成するには

- ◆ 2030年に46%減、2050年に正味ゼロとするCN目標に対しては、出力の小さいSMRよりも、技術が確立し実績豊富、かつ新規規制基準に対応し震災以前に比べ飛躍的に安全性を改善した大型軽水炉の導入が現実的とみるのが自然
- ◆ 新規建設が途絶えて久しい日本においてこのスピードで建設導入するには、綻び始めた原子力サプライチェーンの維持・補強が課題
- ◆ 日本では1970年に始まった軽水炉導入以降、約40年で50GWeの設備を建設した実績あり
- ◆ 需要が生まれさえすれば、チェーンの復帰は思いのほか容易？





目次

◆はじめに

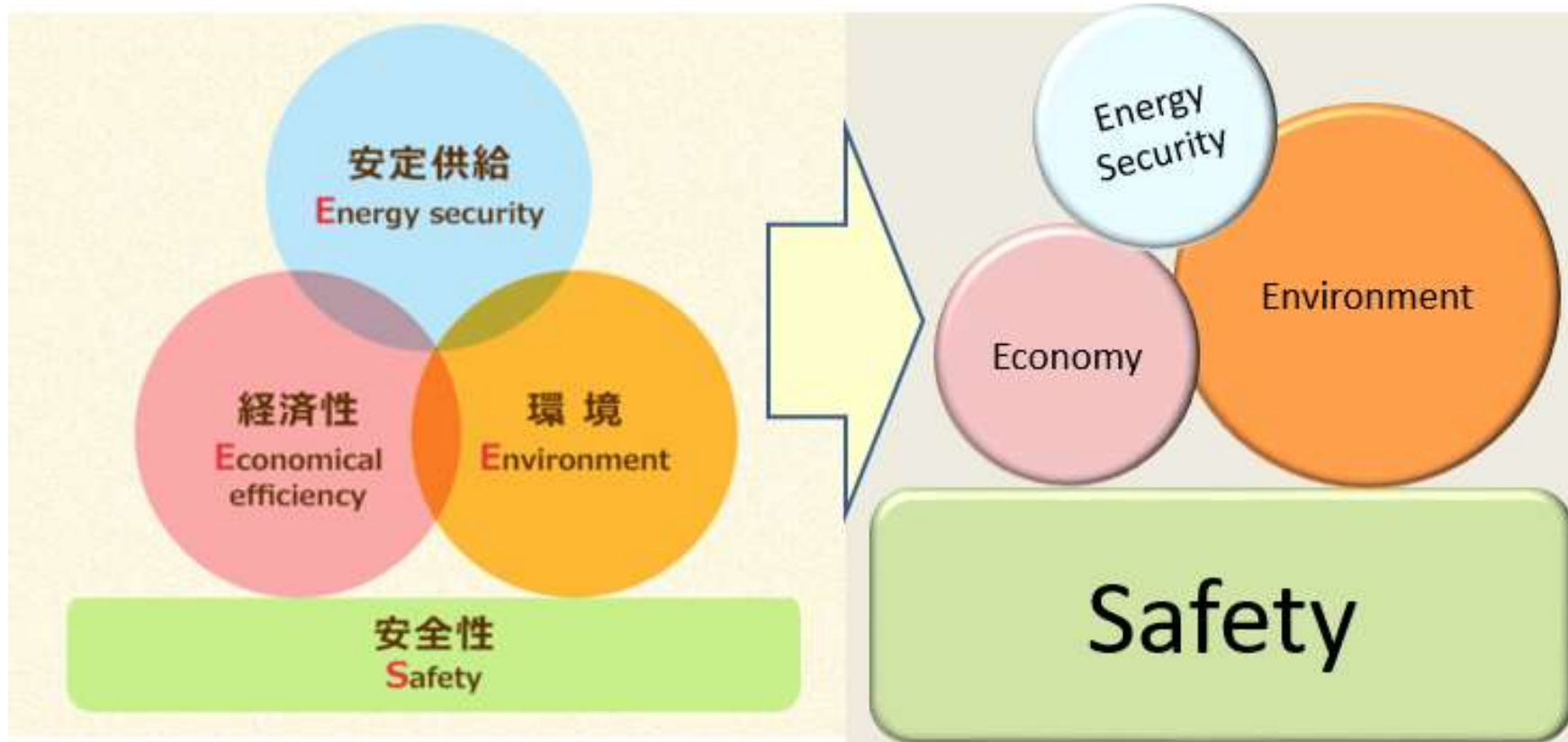
◆原子力発電の短中期的計画

✓◆エネルギー安全保障確保と革新炉

◆廃棄物負荷軽減への革新炉ポテンシャル

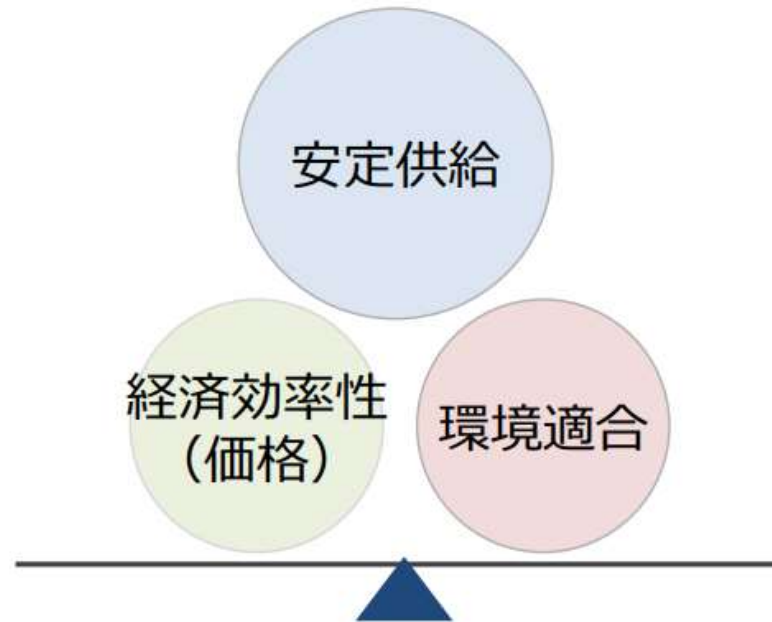
◆おわりに

S+3E



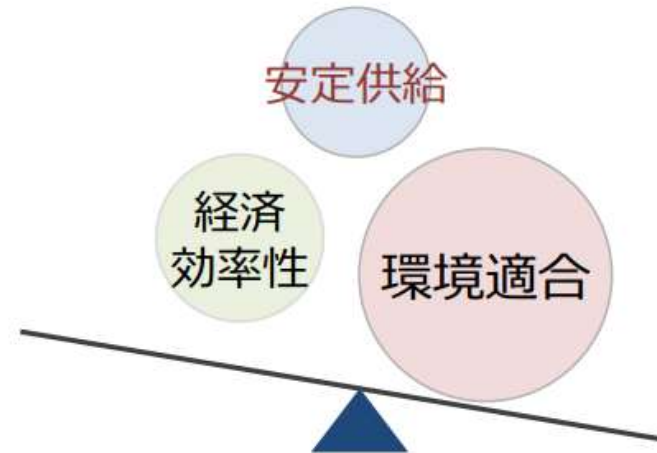
高木、「革新炉開発と発電外用途開拓による原子力イノベーション」
日本原子力学会 北関東支部 令和4年度支部大会 (2022/4/15)

S + 3Eのバランスが保たれている状態



- いずれの要素も満たされていて、バランスしている

安定供給の危機



- 主に安定供給、経済効率性が大きく棄損されており、バランスが崩れている

※直近のわが国において、特に棄損されている指標を反映



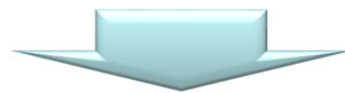
世界人口とエネルギー消費予測

世界人口推移(国連)

- ◆ 2022年11月に80億人、2058年には100億人に到達、2080年代には約104億人でピークとなり、2100年までその水準維持
- ◆ 人口増加と生活の質向上は相乗効果でエネルギー消費量を増大

世界のエネルギー消費(IEA)

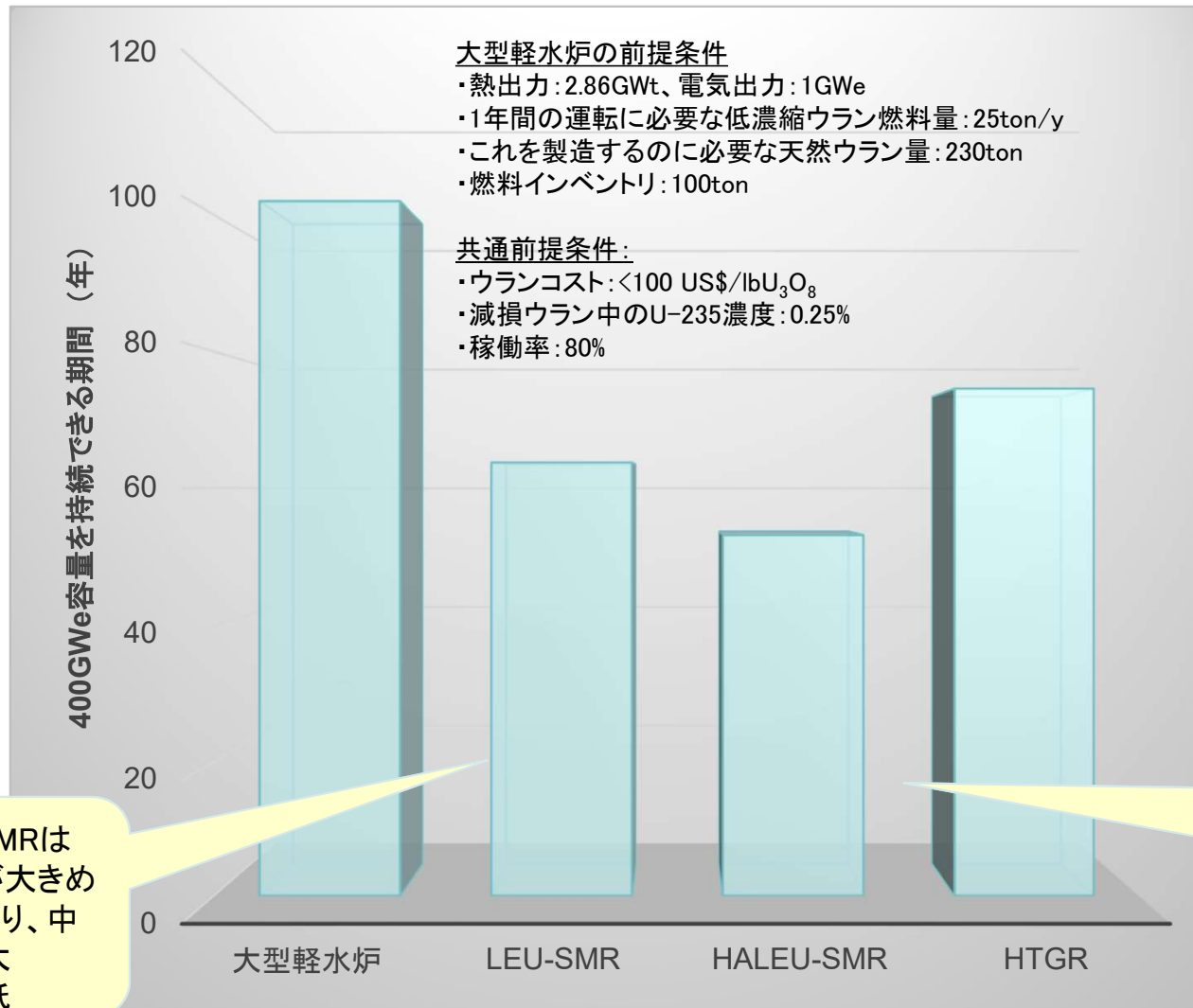
- ◆ 1次エネルギー供給量は、2020年以降2050年までほぼ同水準の550~600EJ/年
- ◆ IEAのネットゼロシナリオでは、2050年時点で化石シェアを20%まで下げ、残りを再エネと原子力で賄う+省エネ、CCUSでネットゼロを達成
- ◆ この時点での原子力の設備容量は、現在の2倍に近い800GWe
- ◆ これはIAEA「2021年版予測」の高位ケースと同等。低位ケースでも現在レベルのまま2050年まで維持



原子炉を動かすためのウラン消費は継続・加速 → 調達性・価格は？



ウラン資源量と原子力持続可能期間



熱効率:

- ・大型軽水炉: 35%
- ・SMR: 31%
- ・HTGR: 45%

濃縮度・取出燃焼度:

- ・大型軽水炉: 4.5%・42GWd/t
- ・LEU-SMR: 5.0%・36GWd/t
- ・HALEU-SMR: 10%・60GWd/t
- ・HTGR: 14%・90GWd/t

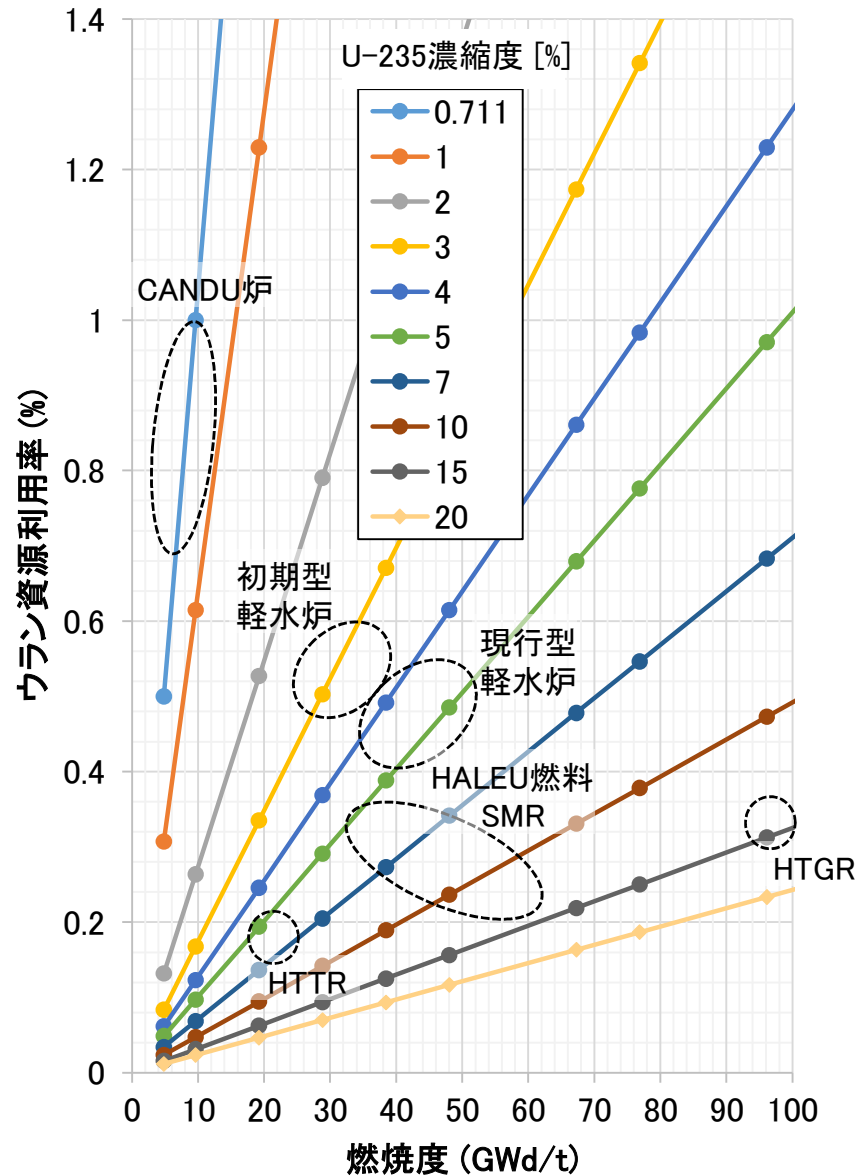
自然循環型SMRは
 ・ H/Dの比が大きめ (≒1.3)であり、中性子漏洩大
 →燃焼度低

HALEU-SMR、HTGRは
 ・ 燃焼度は高いものの、U濃縮度高
 →減損Uまで考慮したU利用率低

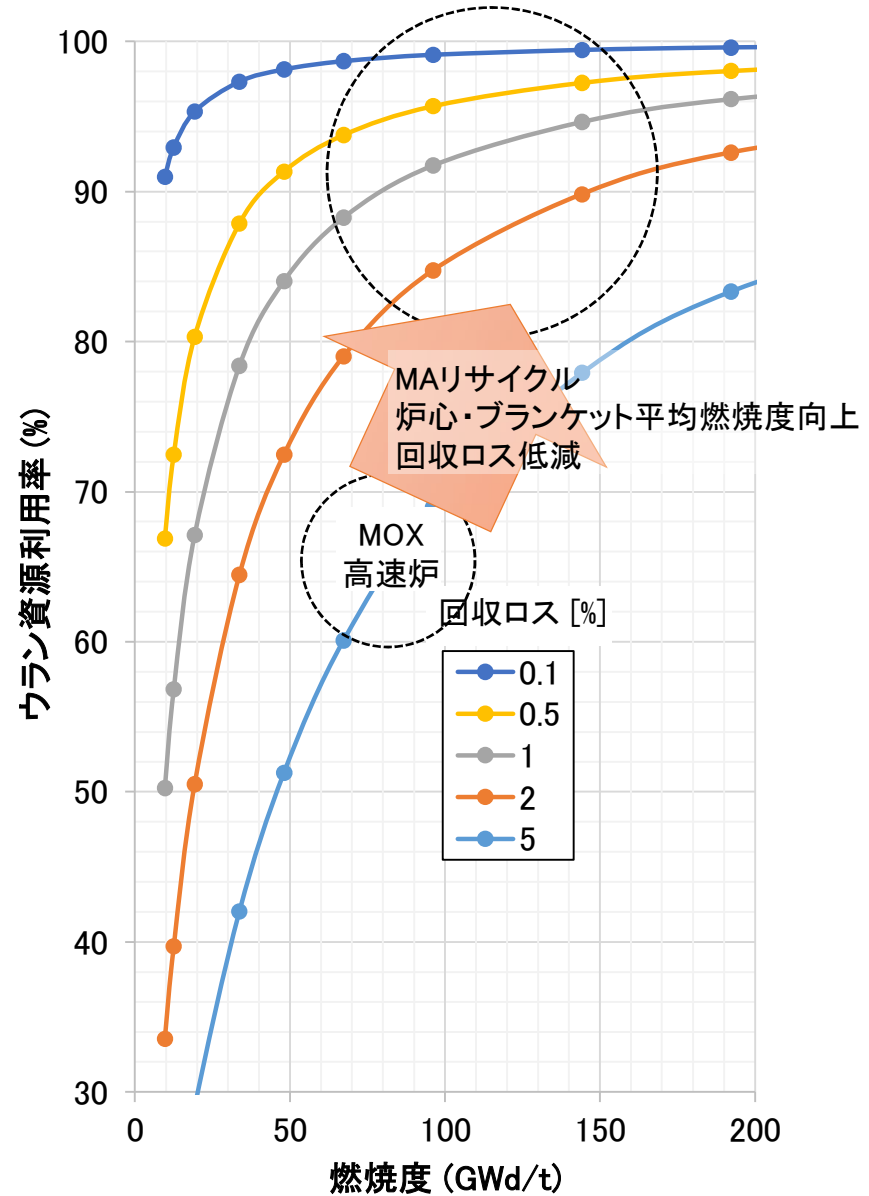
既知ウラン量で400GWe分の発電設備容量を持続可能な年数比較



種々炉型のウラン資源利用率



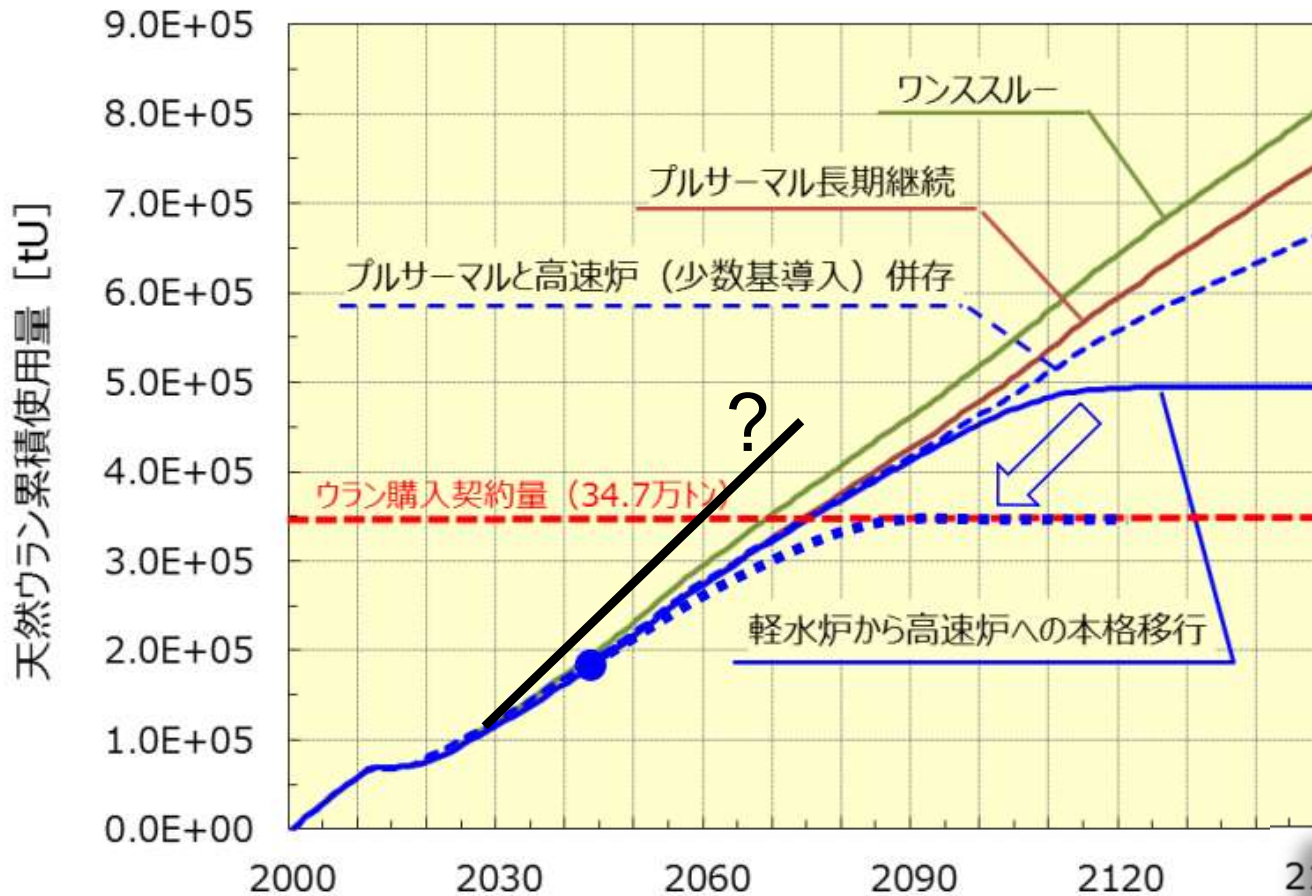
(a) ワンスルー型熱中性子炉



(b) マルチリサイクル型高速増殖炉



日本の天然ウラン累積使用量予測



- 現在の我が国のウラン購入契約量は、長期契約、短期契約及び製品購入、開発輸入分全てを含め約35万ton
- 大型軽水炉ワンスルーを継続する場合、2070年頃にはこの量を上回る可能性
- ウラン資源の流通制限や価格高騰への懸念
- これを回避するには2045年頃からの高速増殖炉導入が必要との評価例あり

大型軽水炉以外のSMR導入は、天然ウランの消費速度を早め、高速炉導入時期に影響

森 行秀、小野 清、大滝 明、高速炉戦略ロードマップ検討会報告
 (2)長期的視点からの検討: 高速炉開発の意義
 2018 年日本原子力学会秋の大会新型炉部会セッション -2H_PL02-



目次

◆はじめに

◆原子力発電の短中期的計画

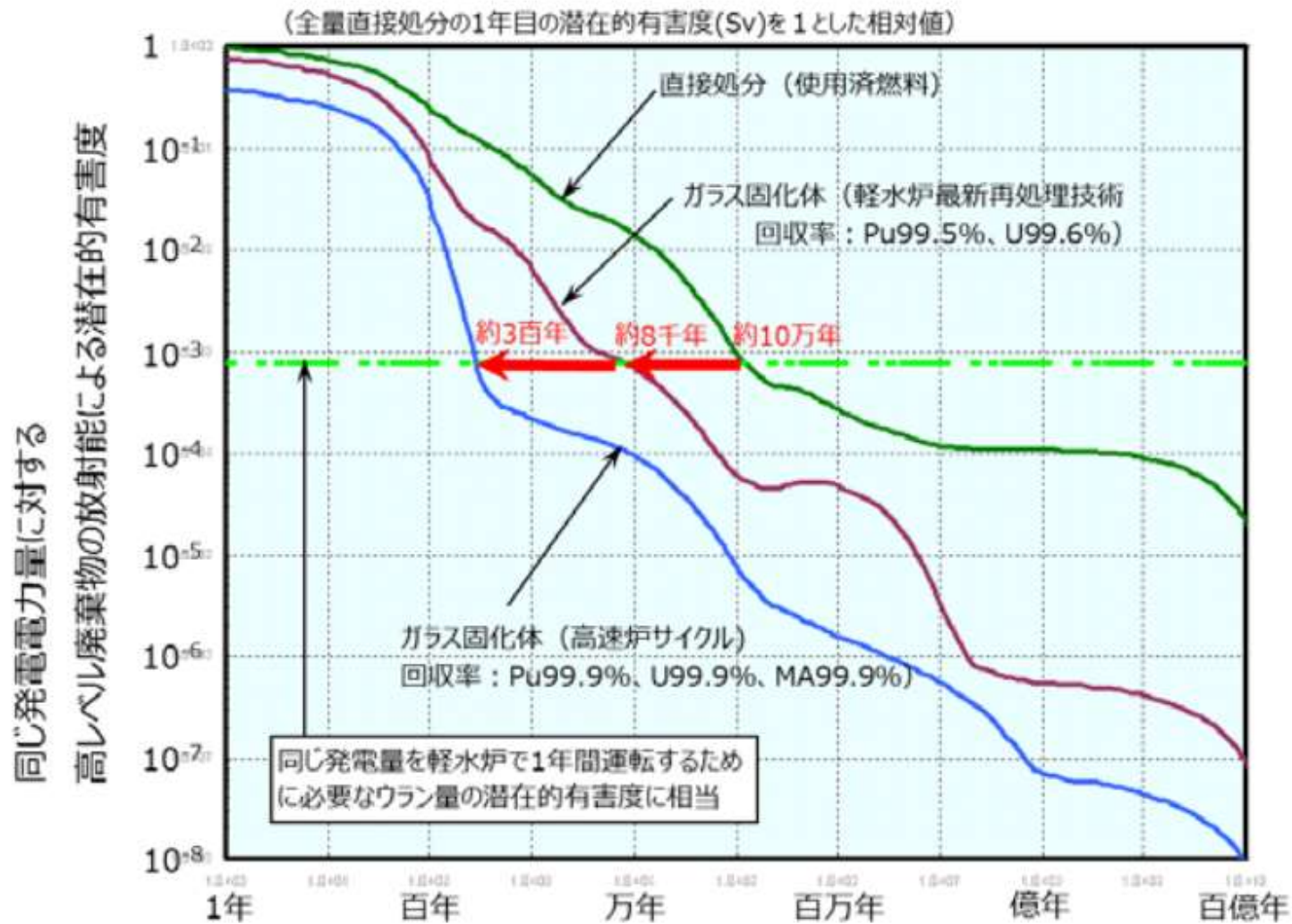
◆エネルギー安全保障確保と革新炉

✓◆廃棄物負荷軽減への革新炉ポテンシャル

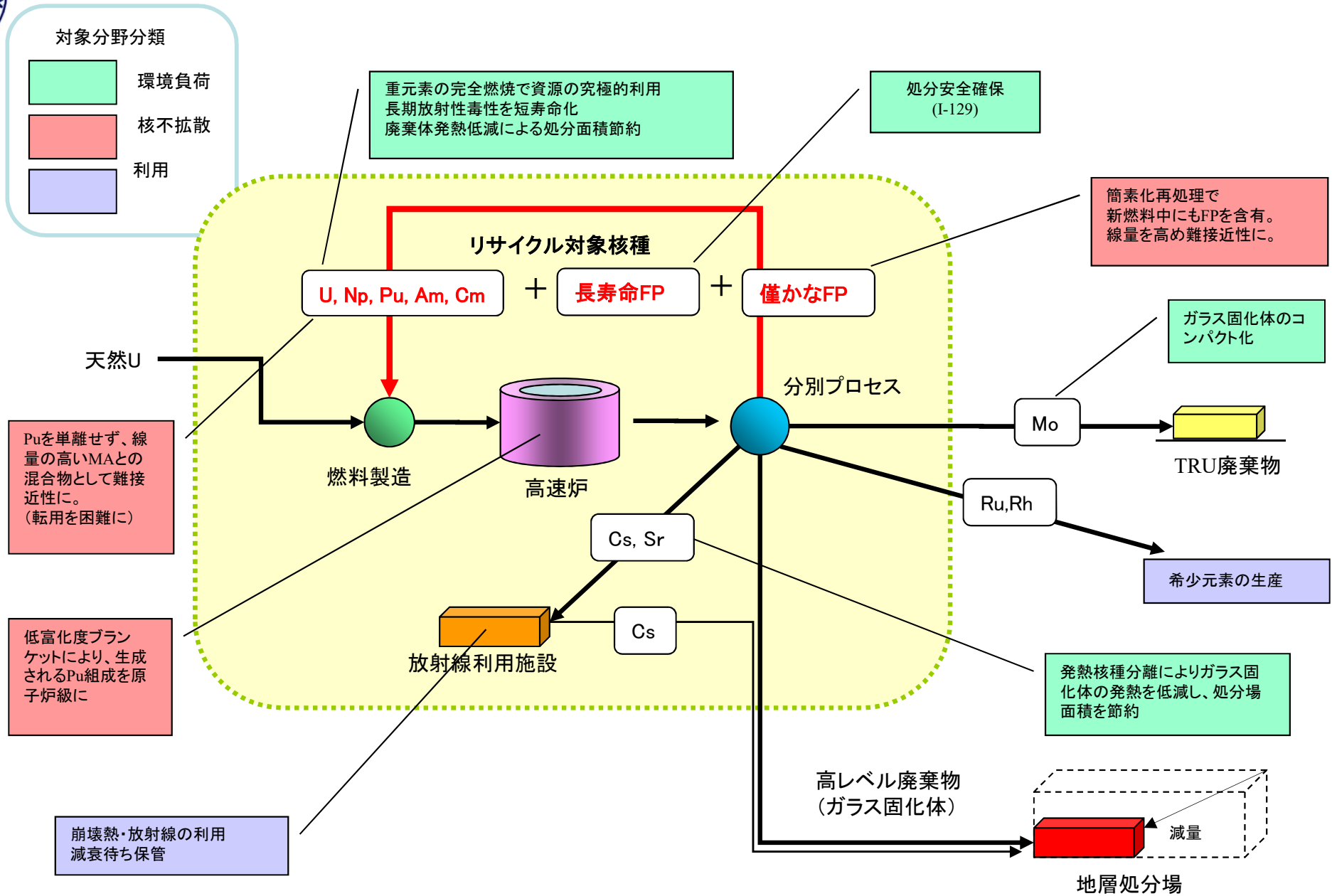
◆おわりに



Pu, MAリサイクルによる 潜在的放射性毒性持続期間の短縮



JAEA 次世代高速炉サイクル研究開発センター 提供



環境負荷や核不拡散に配慮した革新的原子力システム概念の例



放射性廃棄物の何をどうすることが 最終処分の負担軽減になるか？

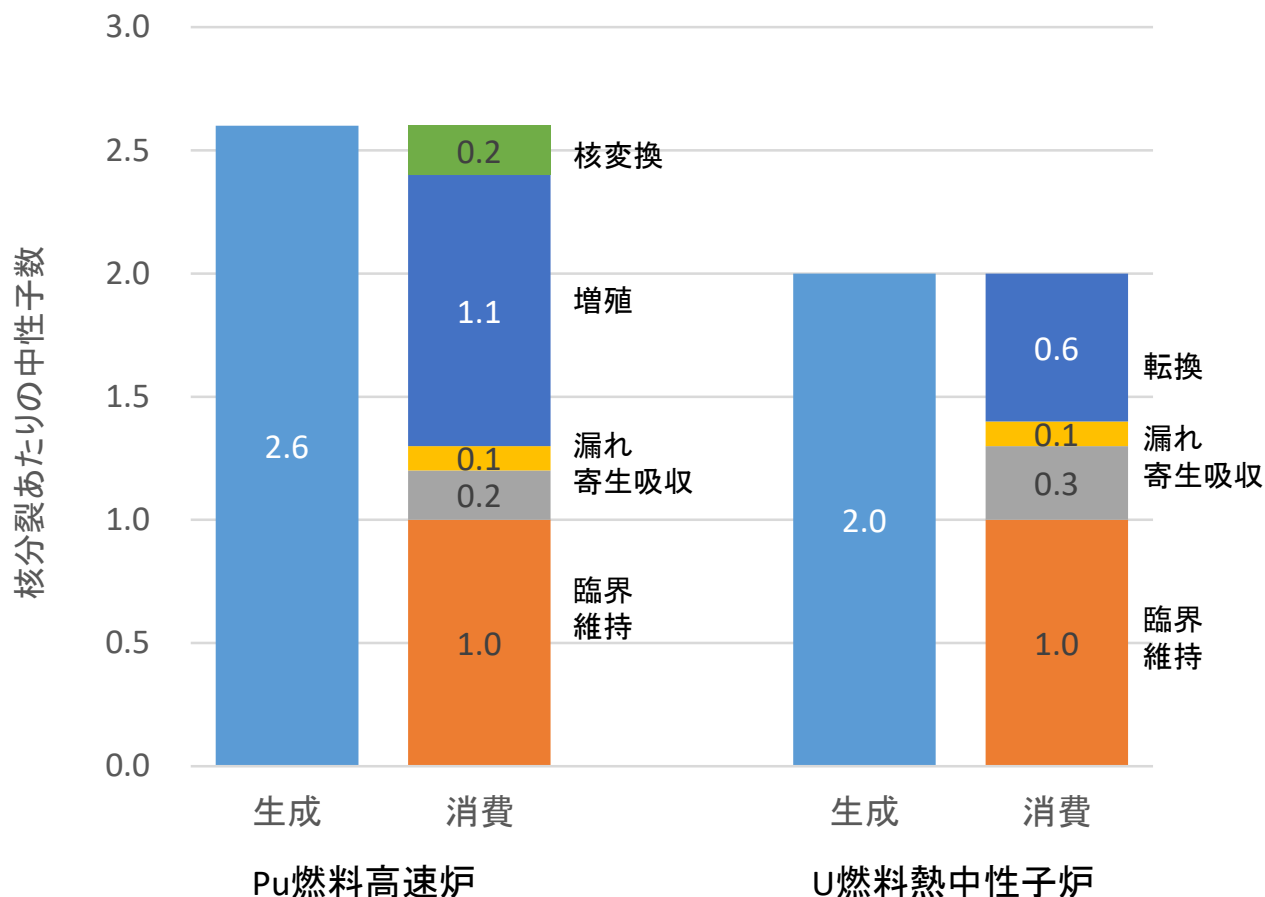
その考察には、

- ◆ 放射能、放射性毒性、存続時間、発熱量、廃棄物体積、処分施設の安全性能等の技術的指標に加えて、
- ◆ 超長期にわたる問題故の、社会的受容性や世代間倫理といった社会的視点も必要であり、
- ◆ 現在でも核変換やバックエンドの専門家間で多様な考え方があ

1. MAリサイクルにより放射性毒性がウランレベル以下となる期間を短縮しても、地層処分場の安全評価結果には何ら変わりが無い
2. MAの主成分であるNp-237の毒性はそもそも低く、さらなる低減は不要である
3. Cs, Sr, Am等の発熱性核種を回収しガラス固化体の発熱量を低減することで廃棄体の処分ピッチを短縮でき処分場面積を縮小できる
4. ガラス固化体に封じ込む事が出来ずかつ岩盤へ吸着されず地中移行し易い長寿命核種I-129、C-14、Cl-36等が重要な核変換対象核種である
5. 移行性のI-129ですら、安全評価によるリスク(線量当量)は $10\mu\text{Sv}/\text{年}$ 以下であり、さらに低減しても処分安全の向上にはつながらない
6. 自然を相手とする超長期の問題故、予測シナリオや安全評価には限界があり、廃棄物のポテンシャルリスクの極力低減やその存続期間短縮の絶え無き追求は原子力業界の責務である

持続性と環境負荷軽減の両立には？

- ◆ いずれにせよ明確なのは、長寿命核種を核変換で短寿命化・安定化するには中性子を消費するため、臨界炉でこれを実施するには十分な中性子が必要なこと
- ◆ 仮に消費する燃料(核分裂性核種)量に制限が無いとすれば、熱炉でもMAやLLFPの核変換は可能だが、これは天然ウラン消費を早め、前章の資源論につながる事となる

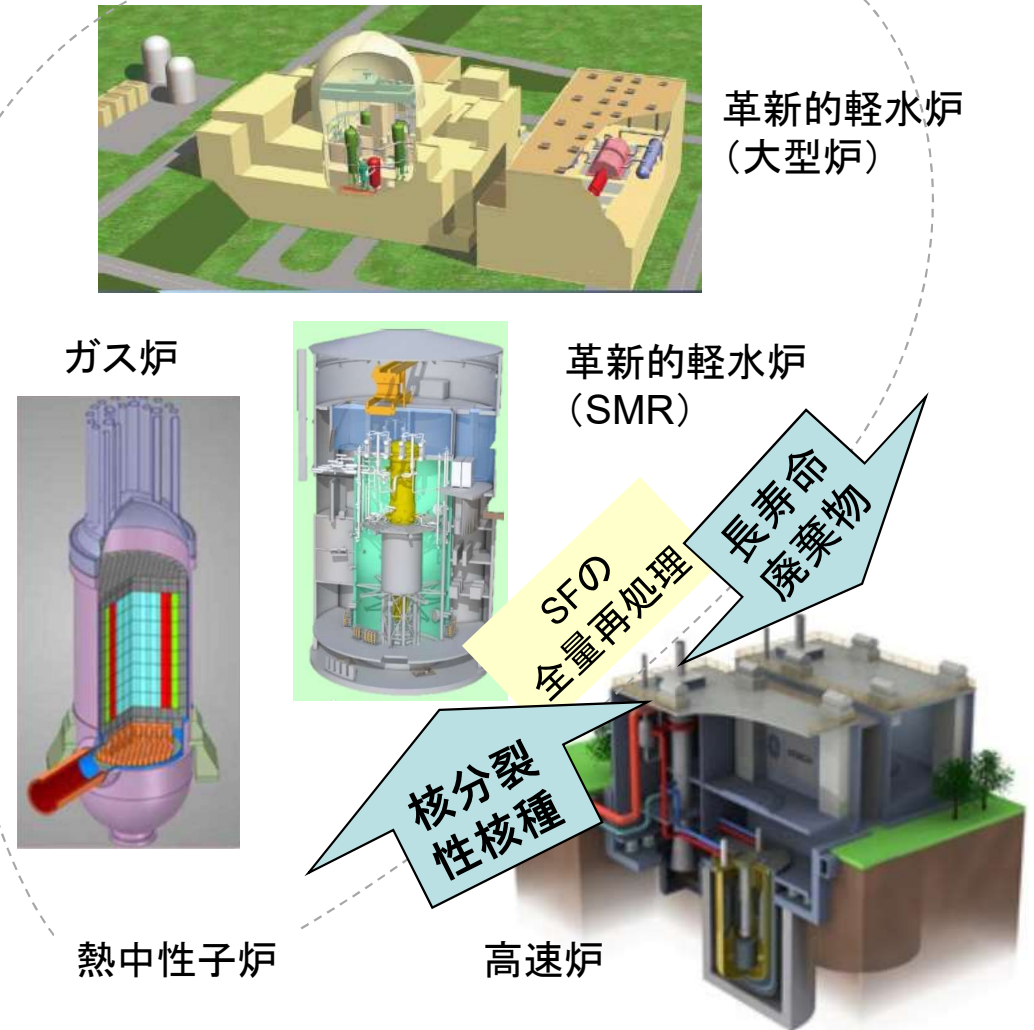


燃料と廃棄物への手当には高速炉が必須



異種炉型の協働的運用

- ◆ 将来の原子力が軽水炉やガス炉等の熱中性子炉と高速炉の複数炉型で構成されることを仮定すると、燃料や消滅対象廃棄物を相互にやり取りする**協働系**として、燃料維持と廃棄物燃焼を両立できる可能性あり
- ◆ 高速炉の持つ高い増殖性能は、十分な発電設備容量に到達した時点でやがて不要となり、熱炉向けの燃料生産や、熱炉で発生した廃棄物の核変換に振り向け可能
- ◆ 軽水炉、SMR、ガス炉、高速炉を資源や廃棄物の視点で相互に関連づけた**導入シナリオ・サイクル諸量**の検討が必要



第1回革新炉WG(20220420)【資料8, 9】より



目次

◆はじめに

◆原子力発電の短中期的計画

◆エネルギー安全保障確保と革新炉

◆廃棄物負荷軽減への革新炉ポテンシャル

✓◆おわりに



おわりに(1/3)

- ◆ 政府のCN目標の達成には、再エネの最大限の導入を図っても、原子力発電の活用が不可欠
- ◆ しかもそれには規模とスピードが必要なため、出力が小さく、開発途上にあり、許認可体制も整っていない革新炉(SMR)の寄与は限定的とならざるを得ない
- ◆ 電力会社の供給規模によっては300MWeのSMRも選択肢に
- ◆ 主役と期待される軽水炉には、既設炉の再稼働と寿命延長、そして革新軽水炉の導入が期待され、それには大きな初期投資に対する政府支援、ファイナンスリスクの回避策が必要
- ◆ ガス炉やSMRの導入は、ウラン資源消費を加速することに配慮必要 (→高速炉導入時期に影響)
- ◆ 複数炉型の同時並行開発は費用、マンパワー的に可能か？

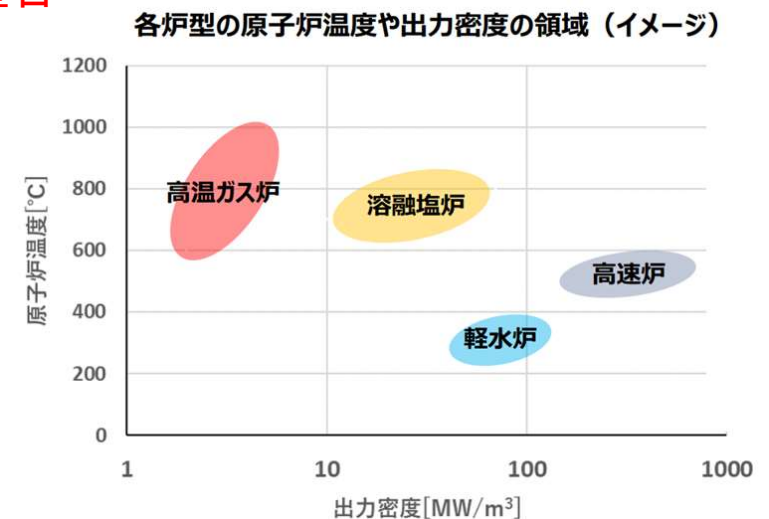


おわりに(2/3)

- ◆ エネルギー安全保障と廃棄物問題の対応には、高速炉が必須
- ◆ 熱炉と高速炉で資源と廃棄物を相互にやりとりする協働系とすることにより、長期に持続性、環境性、水素製造等、各炉型の特徴を活かし相互に補い合う原子力システムを構築可能

◆ ガス炉導入に伴う懸念

- 被覆粒子燃料(CPF)の再処理性
- CPFは廃棄体としての機能もあり、Deep burnし直接処分？
 - その場合、軽水炉・高速炉は再処理+MAリサイクル+ガラス固化処分を目指す一方で、ガス炉SFは直接処分？ → **バックエンド政策に不整合**
- 炉・サイクルの事業主体
- 実用化には出力増強要だが、出力密度がLの1/10、Fの1/100→実用段階で炉心サイズが発電量・水素製造量、経済性、安全性への制約に？
- 水素社会の需要量に対する供給ポテンシャルは？
- その場合の必要基数は？ウラン調達性は？
- 「炉心溶融無し」を前面アピール
 - 革新軽水炉導入理解へのインパクト





おわりに(3/3)

◆ 原子力の新たな価値

- 1F事故を踏まえ強化された安全性
- 合理化設計、製造法・工法工夫による経済性
- 負荷追従性
- 資源有効利用
- 廃棄物の減容・短寿命化
- 水素製造

+

- 医用RI製造
- 宇宙応用

原子力でしか成し得ない
発電以外の「離れ業」は？

持続可能社会やCN達成に
必ずしも「原子力が必然」
とはみられていない

理由:

やがては

- ✓ 蓄電技術の進展により、炭素フリー発電は太陽、風力だけで可能に
- ✓ 核融合の実現

