

次世代革新炉の開発と普及のために

2022年11月17日

山口 彰

原子力安全研究協会 理事

エネルギー資源の確保とS+3E

- **第6次エネルギー基本計画（2021年10月閣議決定）**は、「エネルギー政策の要諦は、安全性（S：Safety）を前提とした上で、エネルギーの安定供給（E：Energy security）を第一とし、経済効率性（E：Economic efficiency）の向上による低コストでのエネルギー供給を実現し、同時に、環境への適合（E：Environment）を図るため、最大限の取組を行うことである」と述べる。
- **1955年12月公布の原子力基本法**公布は、原子力の利用を推進することによって「**エネルギー資源を確保**し、学術の進歩と産業の振興とを図り、もって人類社会の福祉と国民生活の水準向上とに寄与する」
- **1956年、最初の「原子力開発利用長期計画」**が、「原子燃料の国内自給態勢を確立することと、わが国の実情に応じた燃料サイクルを確立することが基本方針である。動力炉は国産することを目標とし、原子燃料資源の有効利用ひいてはエネルギーコストの低下への期待という見地から増殖動力炉とした」

環境の保全と持続的な発展

- エネルギーが国民生活の安定向上並びに国民経済の維持及び発展に欠くことのできないものであるとともに、その利用が地域及び地球の環境に大きな影響を及ぼすことにかんがみ、エネルギーの需給に関する施策に関し、基本方針を定め、並びに国及び地方公共団体の責務等を明らかにするとともに、エネルギーの需給に関する施策の基本となる事項を定めることにより、エネルギーの需給に関する施策を長期的、総合的かつ計画的に推進し、もって地域及び地球の環境の保全に寄与するとともに我が国及び世界の経済社会の持続的な発展に貢献することを目的とする。

エネルギーと経済の安全保障の視点

地域および地球の環境に及ぼす影響の視点

エネルギーミックス

- 原子力政策大綱（2005年10月に閣議決定）
 - 「原子力発電がエネルギー安定供給及び地球温暖化対策に引き続き有意に貢献していくことを期待するためには、2030年以後も総発電電力量の30～40%程度という現在の水準程度か、それ以上の供給割合を原子力発電が担うことを目指す」
- 第6次エネルギー基本計画（2021年10月に閣議決定）
 - 省エネ 1兆920億kWh→8640億kWh（21%）
 - 再生可能エネルギー 36～38%
 - 原子力 20～22%
 - 水素・アンモニア 1%
 - 液化天然ガス 20%
 - 石炭 19%
 - 石油 2%

考慮すべき多様なリスク

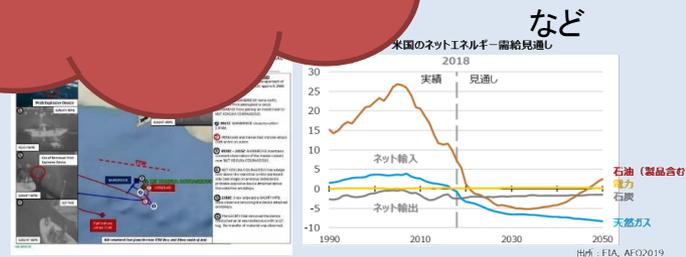
- 地政学的リスク（技術の変化が増幅）
 - 化石資源価格変動のリスク
- 地経学的リスク
 - 先端技術の他国依存リスク
- 送電網に関連したリスク
 - 送電網へのサイバー攻撃リスク
- 各エネルギー源のリスク
 - 再生可能エネルギー系の自然変動リスク
 - 原子力系の事故リスク
 - 化石系の地政学的リスク
 - 蓄電系のレアメタルリスク
- エネルギー競争に劣後するリスク
 - 技術開発投資、発電投資、送電網の増強投資、分散ネットワークへの投資、海外への投資

<自然災害>

- ・北海道胆振東部地震によるブラックアウト
- ・台風による送電線等の破損 など



エネルギー政策は
・資源自給
・発電単価
だけでは語れない



<パリ協定への動き>

- ・長期戦略の策定・提出
- ・G20エネルギー・環境大臣会合 など



第5次エネルギー基本計画にもとづき作成

<https://www.meti.go.jp/press/2018/07/20180703001/20180703001.html>

エネルギー基本計画の全体像

- 2050年カーボンニュートラル、2030年度の46%削減、さらに50%の高みをめざして挑戦を続ける新たな削減目標の実現に向けたエネルギー政策の道筋を示すことが重要なテーマ
- 日本のエネルギー需給構造が抱える課題の克服が、もう一つの重要なテーマ。安全性の確保を大前提に、気候変動対策を進める中でも、安定供給の確保やエネルギーコストの低減（S+3E）に向けた取組みを進める

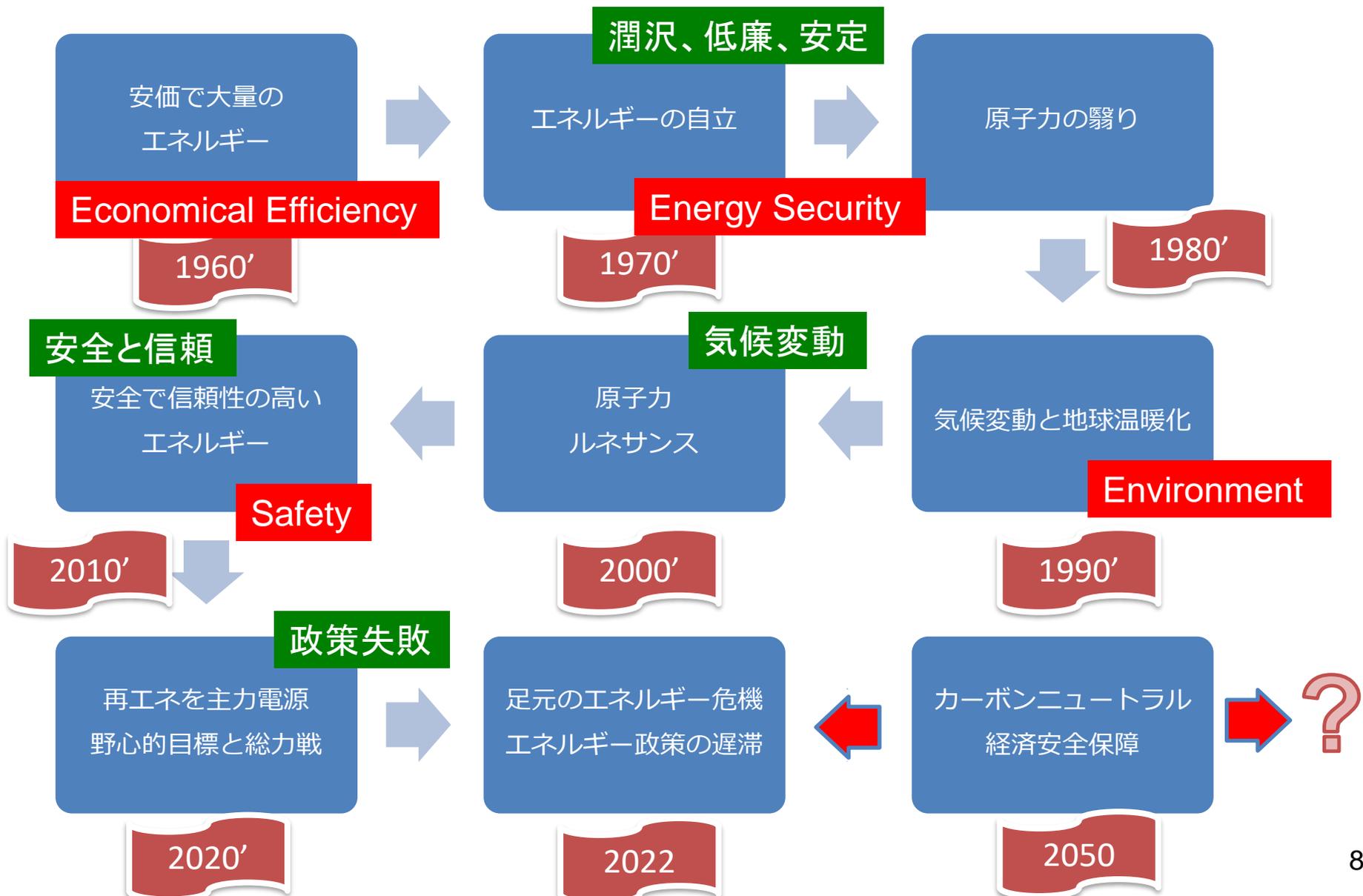
エネルギー基本計画後、一年間の動き

- ロシアによりウクライナ侵攻に起因する「石油・ガス市場攪乱」
- 構造的かつ周期的に起こり得る「安保直結型エネルギー危機」の時代
- エネルギーをめぐる世界の「断層的変動」

第2回GX実行会議、2022年8月24日

日本においては、「足元のエネルギー危機」と「エネルギー政策の遅滞」が顕在化

エネルギー政策の変遷



エネルギーシェアのロジスティックモデル

- あるエネルギーが占めるシェアを F とすると、 $\ln F$ の変化率はそれ以外のエネルギー源のシェア $(1 - F)$ に比例（ロジスティック方程式）

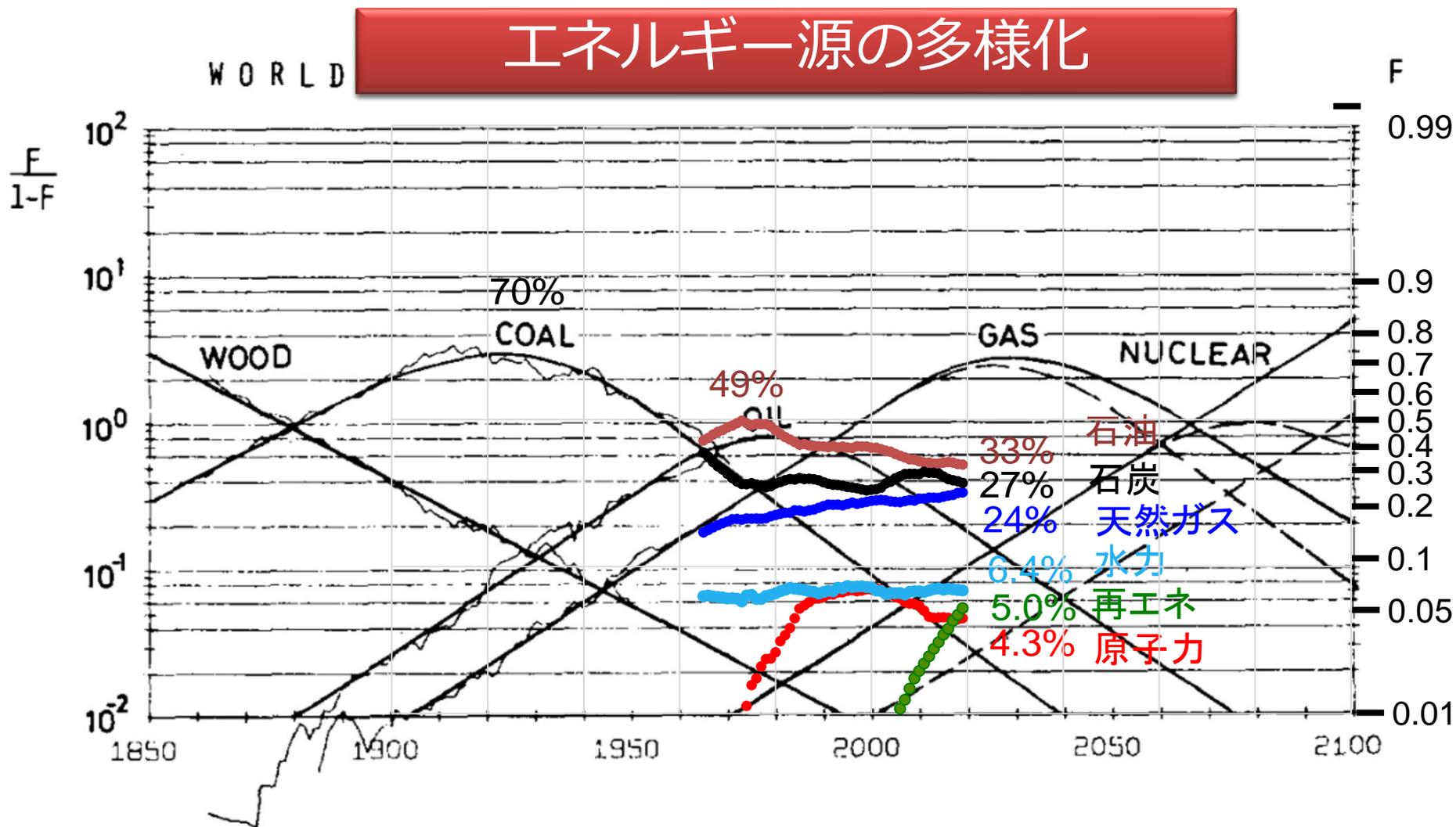
$$\frac{1}{F} \frac{dF}{dt} = \frac{d \ln F}{dt} = \alpha(1 - F)$$

$$\ln \left(\frac{F}{1 - F} \right) = \alpha t + c$$

石炭	27.0%
石油	33.1%
ガス	24.2%
原子力	4.3%
水力	6.4%
再エネ	5.0%

- $\ln \left(\frac{F}{1 - F} \right)$ を t に関して勾配が α の直線となる→成長期、停滞期、減退期
- 各エネルギー源のシェアの総和 $\sum F_i = 1$ である

マルケッティのエネルギー予測



エネルギーの将来展望

- 1970年以前は、新エネルギー技術の登場が、旧エネルギーを置き換えてきた。以下が順次、エネルギーの主役を担うとしていた
 - 薪（潤沢・低廉・安定）
 - 石炭（潤沢・低廉・安定）
 - 石油（潤沢・低廉・安定）
 - ガス（潤沢・低廉・安定）
 - 原子力：軽水炉（潤沢、低廉、安定）
- オイルショックを機に電源多様化の道に進んでいた
- 国によっては国際連系線や豊富な水力発電が備蓄機能として潤沢・低廉・安定に寄与した

- 電力自由化と気候変動対応の流れで「潤沢・低廉・安定」というエネルギーの価値にかかわる環境が大きく変化
 - 再生可能エネルギーへの過度な期待
 - 潤沢・低廉・安定電源の事業予見性の欠如

潤沢・低廉・安定⇒S+3E⇒3S+Eへ

■ Safety

- 運転安全性
- 事故リスクの評価・管理

■ Security

- 資源の自給
- 技術の自給
- リスクの管理

■ Sustainability

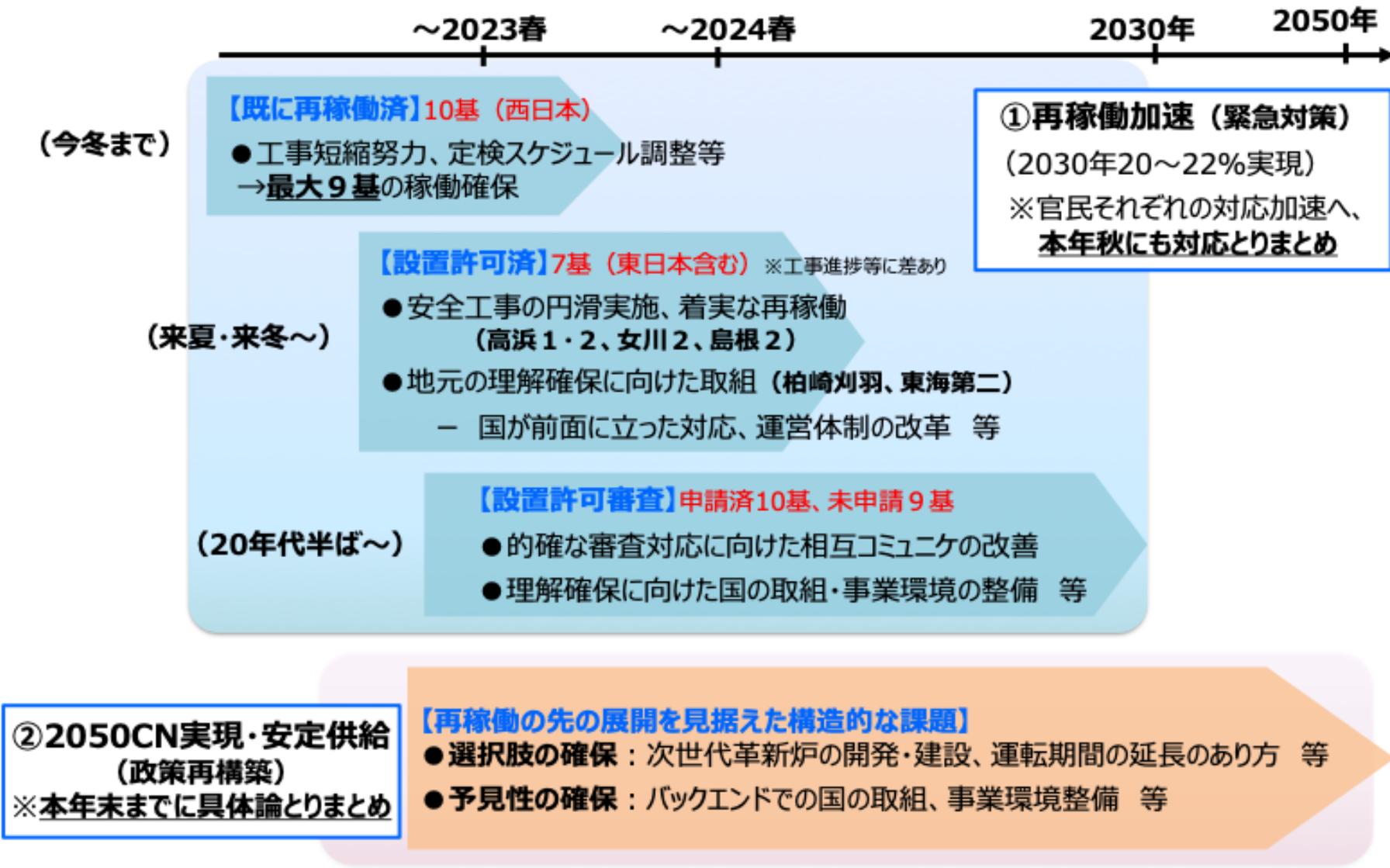
- 資源の長期利用
- 環境の保護

■ Economic Efficiency

- ライフサイクルコスト
- システムコスト
- 財務リスク

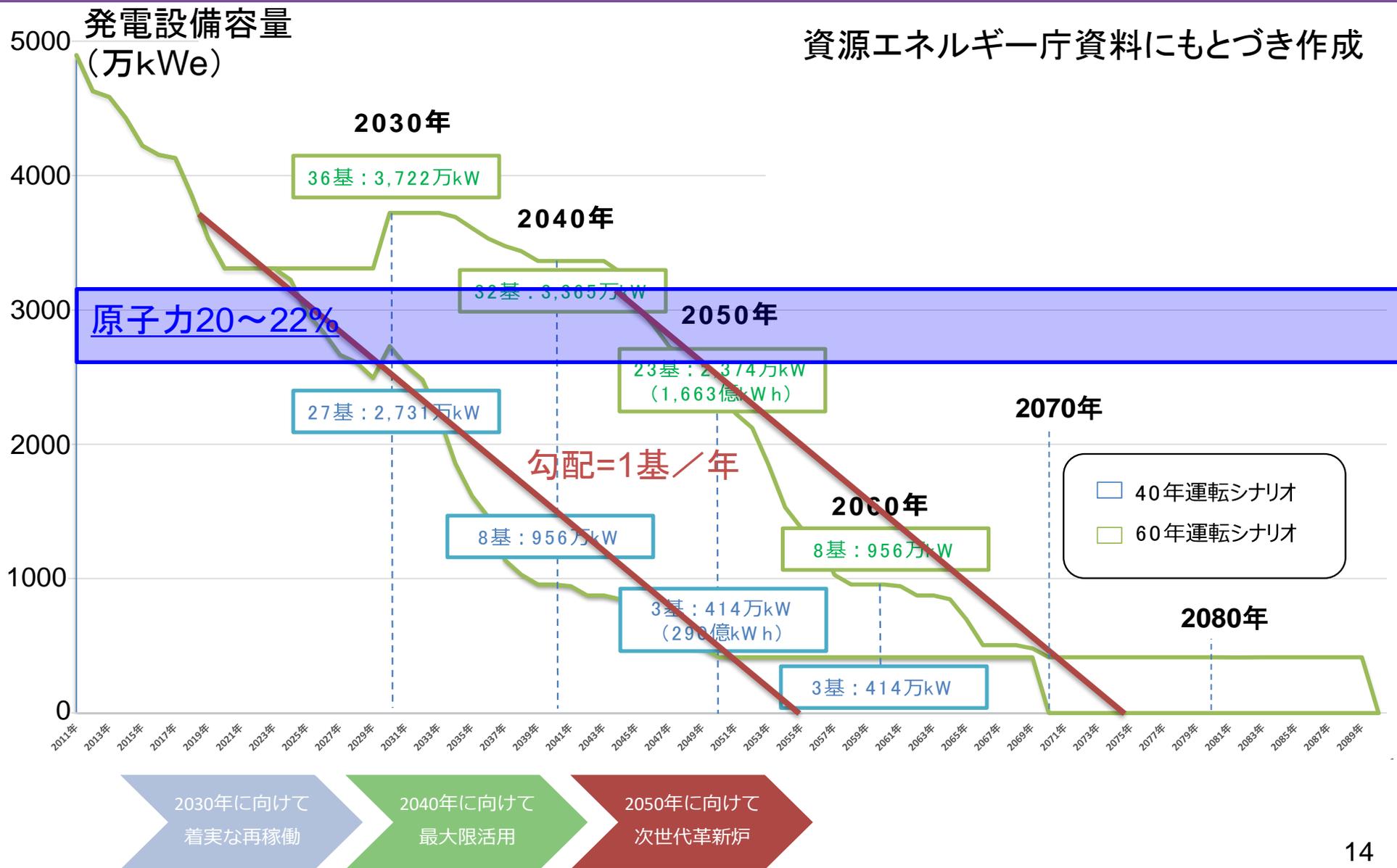


グリーントランスフォーメーションに向けての原子力政策



原子力発電比率のシナリオ

資源エネルギー庁資料にもとづき作成



次世代革新炉（核分裂炉）開発

■ 革新軽水炉

- 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**

■ 小型軽水炉

- **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、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

■ 高速炉

- **既存の軽水炉を含めた原子力技術が資源循環性を獲得**。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。「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・水素をコージェネレーション**することを念頭、国際連携の可能性も追及しながら開発を推進。試験炉「HTTR」を活用して熱利用・水素実証も推進。

小型モジュール炉の分類

■ 軽水一単機

- 既に確立した軽水炉技術と燃料による
- 小型の火力発電所の後継あるいは分散型電源として有用

■ 軽水一多機

- 既に確立した軽水炉技術と燃料による
- 中型のベースロード電源あるいは分散型電源として有用

■ 可搬型

- 現状では軽水炉技術をもちい、場所を容易に移動できる
- 浮体式原子炉も含まれる

■ 第4世代

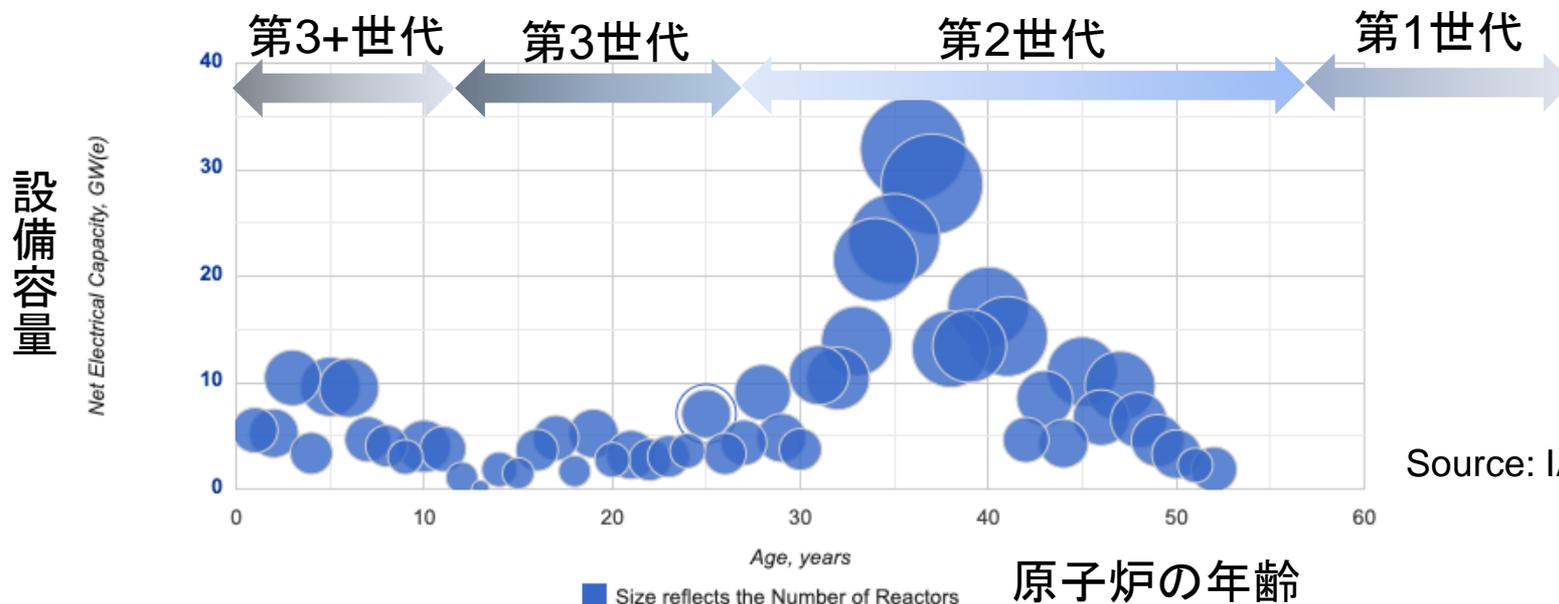
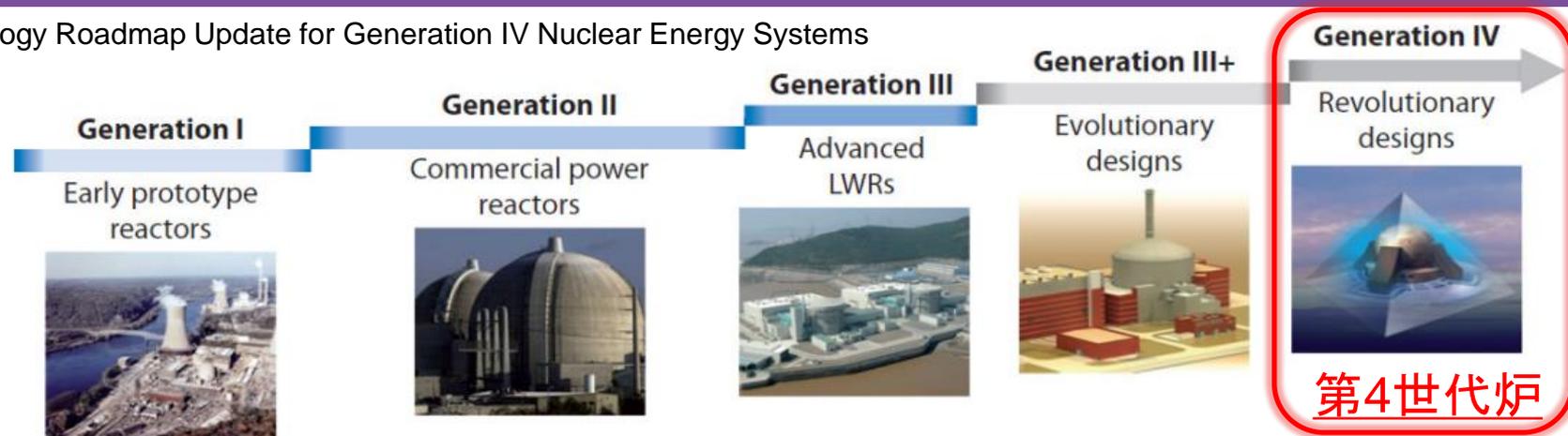
- 革新的な非軽水炉技術を用いる、国際第4世代原子炉フォーラムで議論
- 資源有効利用と高レベル廃棄物減容・毒性低減が可能

■ マイクロモジュール炉

- 10MW以下の出力で、自律的運転が可能
- 可搬性を向上させ、主として系統接続できない遠隔地で利用

原子力発電所の“世代”とは

Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems



Source: IAEA, PRIS

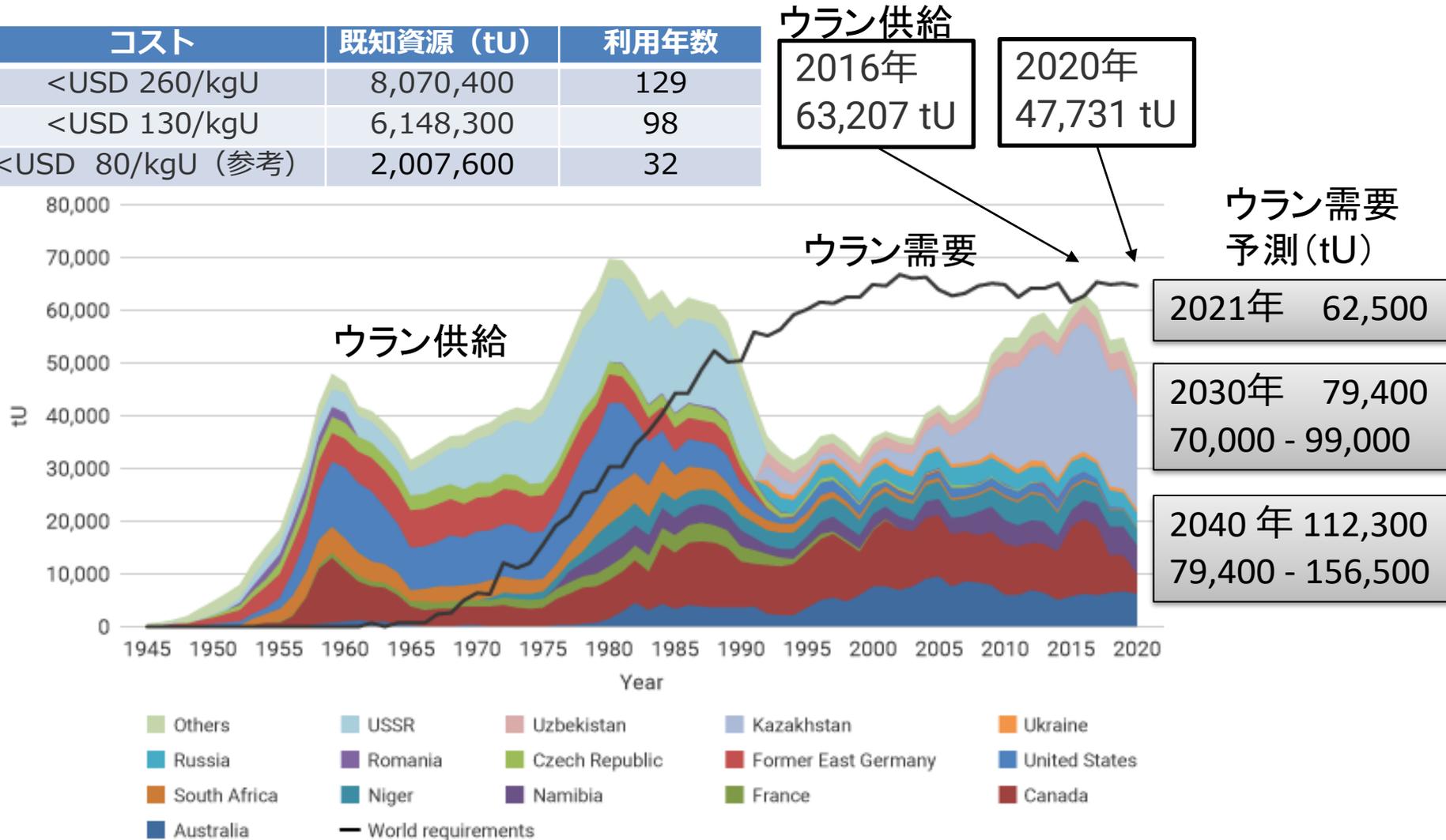
第4世代の原子力エネルギーシステム

21世紀の経済的、環境的、社会的要請に応える4分野の8目標

- 持続可能性
 - 全地球的に、持続可能なエネルギー生産（クリーンで、長期的に利用可能なシステムであり、燃料を有効利用できること）を提供できる
 - 放射性廃棄物を最小限に抑え、管理し、特に長期的な管理負担を軽減し、それによって公衆衛生と環境の防護を向上させる
- 経済性
 - 他のエネルギー源よりもライフサイクルコストの明らかな優位性を有する
 - その財務リスクは、他のエネルギー源のプロジェクトと同等レベルである
- 安全性と信頼性
 - 運転時の安全性と信頼性が優れている
 - 炉心損傷発生頻度とその影響度がきわめて低い
 - オフサイトの緊急対応が必要でない
- 核拡散抵抗性と核物質防護
 - 武器に転用可能な物質が、非常に魅力的ではなく、流用または盗取には経路が困難であることを保証を高め、テロ行為に対する核物質防護を強化する

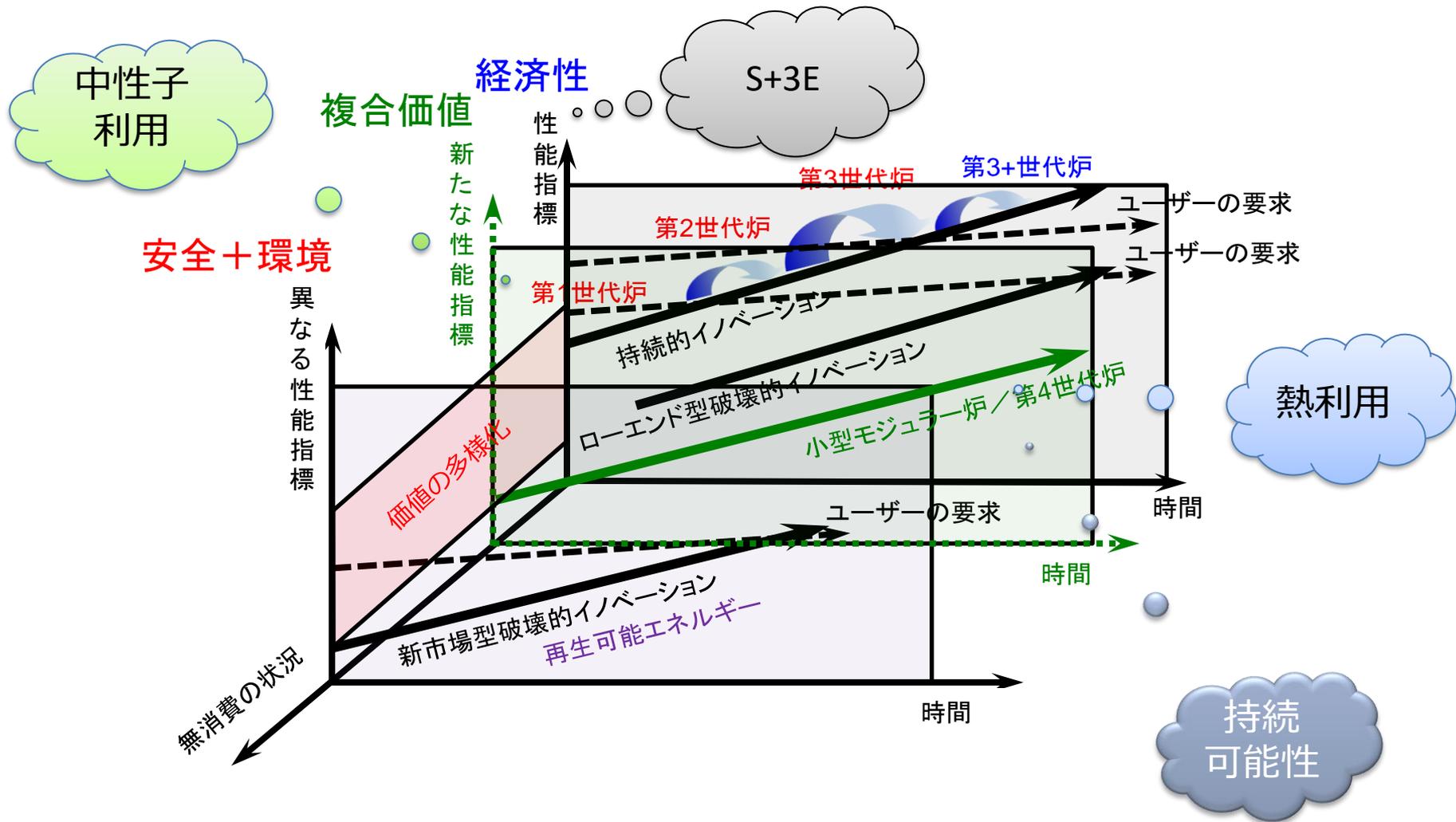
ウランの供給と需要、既知資源と利用年数

コスト	既知資源 (tU)	利用年数
<USD 260/kgU	8,070,400	129
<USD 130/kgU	6,148,300	98
<USD 80/kgU (参考)	2,007,600	32



Source: World Uranium Mining - World Nuclear Association (world-nuclear.org)
Uranium 2020, Resource, Production and Demand, IAEA

複合価値型イノベーション



クリステンセン、イノベーションの最終解、翔泳社(2014)の図1-1を参考

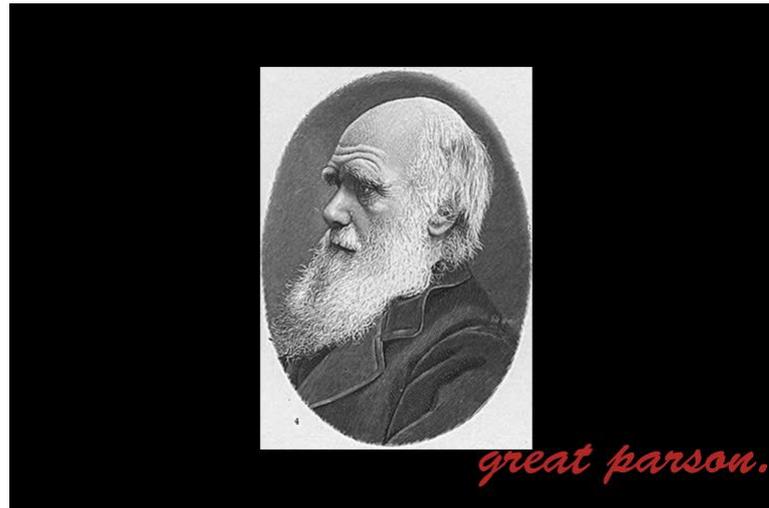
発明は必要の母

- 必要は発明の母 — これは錯覚！
 - 非凡な天才が社会のニーズを汲み取って、それを実現する大発明をする??
- 発明は必要の母 — これが現実！
 - 現実には数多くの先人の発明を改良する
 - その発明がマッチする応用があるとき、その発明の応用を見出したとき、大発明が誕生する
- 経済性、社会的ステータス、既存システムとの互換性、わかりやすいメリット

イノベーションを生み出し続けることが社会のニーズを呼ぶ

終わりに

- チャールズ R. ダーウィン (Charles Robert Darwin)
 - 1809年2月12日-1882年4月19日
- It is not the strongest of the species that survives, nor the most intelligent that survives. It is the one that is most adaptable to change.



- 最も強い者が生き残るのではなく、最も賢い者が生き延びるのでもない。生き残るのは、変化に最もよく適応できる者である。