

東京都市大・早稲田大学 大学院共同原子力専攻 シンポジウム
「カーボンニュートラルを目指す日本のエネルギー政策と原子力」

炉型と核燃料サイクル の長期的な戦略

2021年7月7日

日本原燃(株)フェロー

田中治邦

目次

■ 世界の原子力

- ◇ 世界の炉型選択と再処理の経験
- ◇ 世界の原子力の将来見通し

■ 日本の原子力

- ◇ 日本の原子力の現状
- ◇ 日本の原子力の将来
 - 2030年の原発依存度22～20%の実現方法
 - 2050年の原発依存度を可能な限り減らす影響
 - 2050年以降も原子力発電を維持する方法
 - Pu保有量の問題

■ まとめ

世界の炉型選択と 再処理の経験

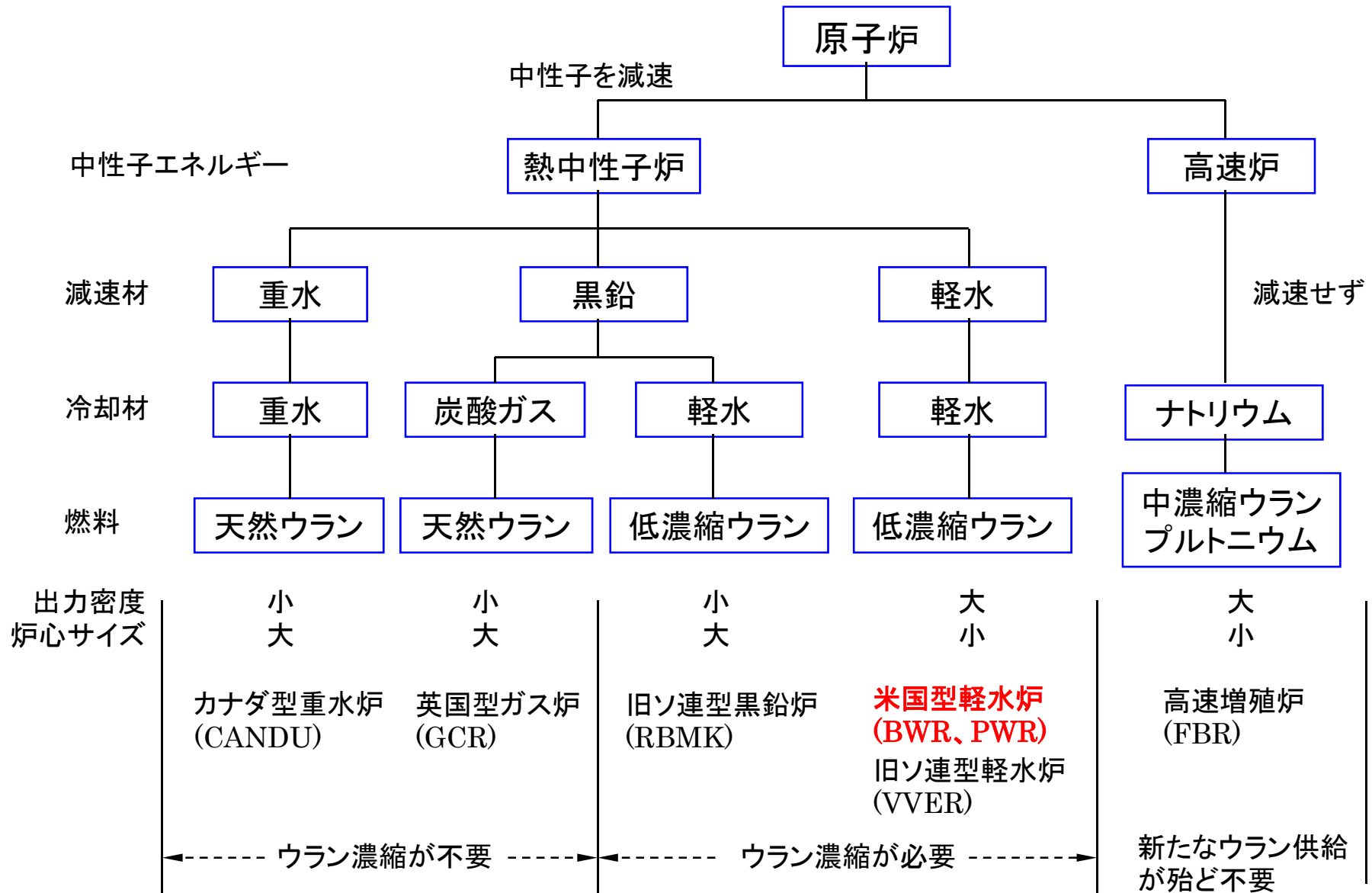
世界の動力炉開発

- 1951年(昭和26年) **米国** 世界初の原子力発電(**EBR-1**; Na冷却高速増殖実験炉)
- 1953年(昭和28年) アイゼンハワー大統領が国連総会でAtoms for peace提案
- 1954年(昭和29年) **ソ連** オブニスク原発(**黒鉛減速・水冷却**、5千kW)を運開
米国で世界最初の**原子力潜水艦**ノーチラス号(PWR)進水
- 1955年(昭和30年) **ジュネーブ**で第1回**原子力平和利用国際会議**が開催
米、英、ソが原子力技術を公開
- 1956年(昭和31年) **英国** **コールダーホール炉**(黒鉛減速・炭酸ガス冷却 6万kW)運開
- 1956年(昭和31年) 米国アルゴンヌ国立研 **BWR**実験炉(5千kW)発電成功
- 1957年(昭和32年) 米国 シッピングポート原発(WH社製**PWR** 9万kW)運開
- 1959年(昭和34年) **仏国** 炭酸ガス冷却Pu生産兼発電炉GC2(4万kW)運開
- 1960年(昭和35年) 米国 ドレスデン1号(GE社製BWR 20万kW)運開
- 1962年(昭和37年) **カナダ** **CANDU**実証炉(重水減速 2万5千kW)運開



核分裂の発見(1938年)から13年で原子力発電に成功し、先進国が次々と独自原子炉を開発(ほぼ10年で出揃った)

原子炉の型式と各国の選択



(参考) 海外の再処理工場(1)

■ 米国

- ◇ ハンフォードに軍事用 5プラント(1944年～現在全て閉鎖)
- ◇ サバンナリバーに軍事用 2プラント(1954年～現在全て閉鎖)
- ◇ アイダホに研究炉用 2プラント(1953年～現在全て閉鎖)
- ◇ 民間再処理では 1工場が操業、3工場が計画を中止
 - NFS社ウェストバレー (300 t/年 1966～1972年に操業)
 - GE社ミッドウェスト (300t/年 建設中に技術的問題の発生で断念)
 - AGNS社バーンウェル (1,500t/年 ほぼ完成後に核不拡散政策により断念)
 - Exxon社NFRP (計画のみ)

■ 英国

- ◇ セラフィールドに 4プラント (1952年～現在全て閉鎖)
 - ガス炉用B204 (500 t/年 1952～1964年に操業)
 - ガス炉用B205 (1,500 t/年 1964～2012年に操業)
 - 軽水炉用FEP (400 t/年 1969～1973年に操業)
 - 軽水炉用THORP (1,200 t/年 1994～2018年に操業)
- ◇ ドーンレイに 3プラント (1958年～現在全て閉鎖)
 - いずれも小規模で、MTR用、DFR用、PFR用

(参考) 海外の再処理工場(2)

■ フランス

◇ **マルクール**に**4プラント**(1958年～現在全て閉鎖)

➤ ガス炉用 **UP1** (400 t/年 1958～1997年に操業)

➤ 高速炉用 3プラント (いずれも小規模)

◇ **ラアーグ**に**2プラント**

➤ ガス炉用 UP2 (1,000 t/年 1966年～1987年に操業)

➤ 軽水炉用 UP2-400 (400 t/年 1976年～1994年に操業)

➤ 軽水炉用 **UP2-800** (1,000 t/年 MOXも再処理 1994年～**現在も操業中**)

➤ 軽水炉用 **UP3** (1,000 t/年 MOXも再処理 1989年～**現在も操業中**)

■ ドイツ

◇ カールスルーエに**WAK**(30t/年 1971～1990年に操業) 他2基のパイロットプラント

◇ **バックースドルフ**に**WAW** (500t/年 1985年着工、中止)

■ ベルギー

◇ モルに**ユーロケミック** (100t/年 1966～1974年に操業) 他にパイロットプラント1基

(参考) 海外の再処理工場(3)

■ イタリア

- ◇ ベルセリに**ユーレックス SFRE** (10t/年 1970～1990年に操業)
- ◇ マテラに**ITREC** (5t/年 1975～1988年に操業)

■ ブラジル

- ◇ **サンパウロ**に研究用施設(1982～1993年)

■ アルゼンチン

- ◇ ブエノスアイレスに**Ezeiza** (PHWR用パイロットプラント 5t/年 1994年～現況不詳)

■ インド

- ◇ **トロンベイ**(重水炉用 30t/年 1964年～)
- ◇ **タラプール第1工場**(100t/年 1977年～)、**第2工場**(100t/年 2011年～)
- ◇ **カルパッカム**(重水炉用 100t/年 1998年～)

■ パキスタン

- ◇ ラワルピンジーに**ビンステック**(軍事用 1982年～)
- ◇ **チャスマ**に商業用工場(不詳)

(参考) 海外の再処理工場(4)

■ ロシア

◇ チェリヤピンスク(マヤーク)に**3プラント**

- 1号(軍事用 1948~1960年に操業)
- 2号(軍事用 1959~1987年に操業)
- 3号(RT-1 商業用 400t/年 1971年~)

◇ トムスクに**1プラント**

- トムスク7(軍事用 1955年~現況不詳)

◇ クラスノヤルスクに**2プラント**

- クラスノヤルスク26(軍事用 1964年~現況不詳)
- ゼレズノゴルスクに建設中(RT-2 商業用 1,500t/年 建設工事は未再開)

■ 中国

◇ 甘肅省**酒泉**に軍事用 **2プラント**(詳細不詳 1968年~ 1基は閉鎖)

◇ 甘肅省**蘭州**に RPP(50t/年 2007年~)

◇ 甘肅省**嘉峪関**に MRF(800t/年 計画中 仏ORANOが支援)

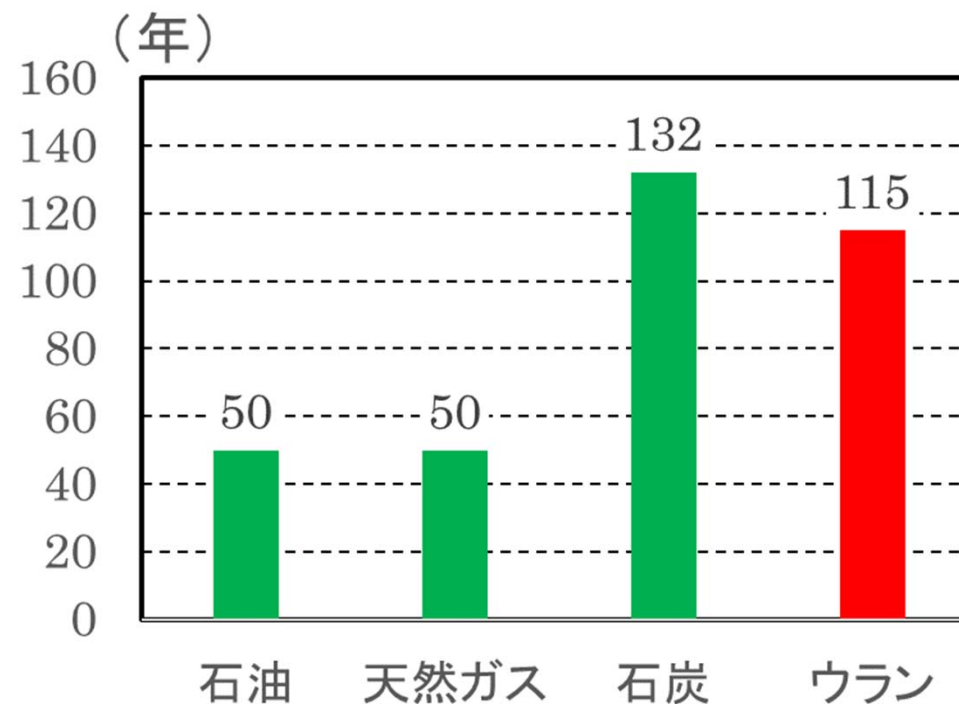
世界の原子力の 将来見通し

エネルギー資源の可採年数

■ 可採年数(年) = 確認可採埋蔵量(トン) ÷ 年間生産量(トン/年)

- ◇ **需要増**で資源採掘の収支が好転し**新規の発見**、**開発凍結の解除**などで可採埋蔵量が漸増し、生産の進捗に拘らず埋蔵量は今まで減らなかった
- ◇ しかし、在来型の原油資源の採掘はピークに達したとの説あり、一方**非在来型**のシェールオイルの生産が始まったが、有限であることは不変

■ **ウラン**も有限で、化石燃料と比べ大した**優位性は無いように見える**



ウランの資源量と可採年数

■ Uranium 2020 Resources, Production and Demand

- ◇ IAEAとOECD/NEAが2年に1度公表する通称 **Red book**
- ◇ 最新は2019年1月1日時点で纏めたウラン資源量、供給(生産)、需要
- ◇ 既知資源量; 採掘可能な確認埋蔵量と推定埋蔵量の合計
- ◇ **ウランの販売価格に依存**

100 USD/lbU₃O₈以下

807 万トン

50 USD/lbU₃O₈以下

615 万トン

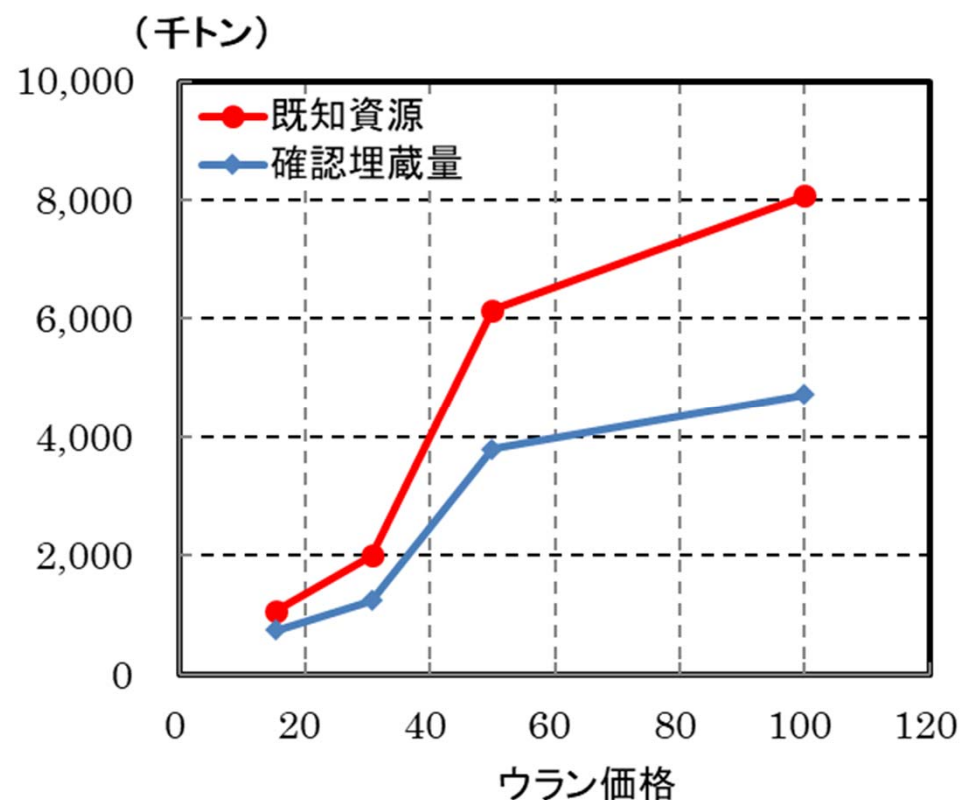
30 USD/lbU₃O₈以下

201 万トン

15 USD/lbU₃O₈以下

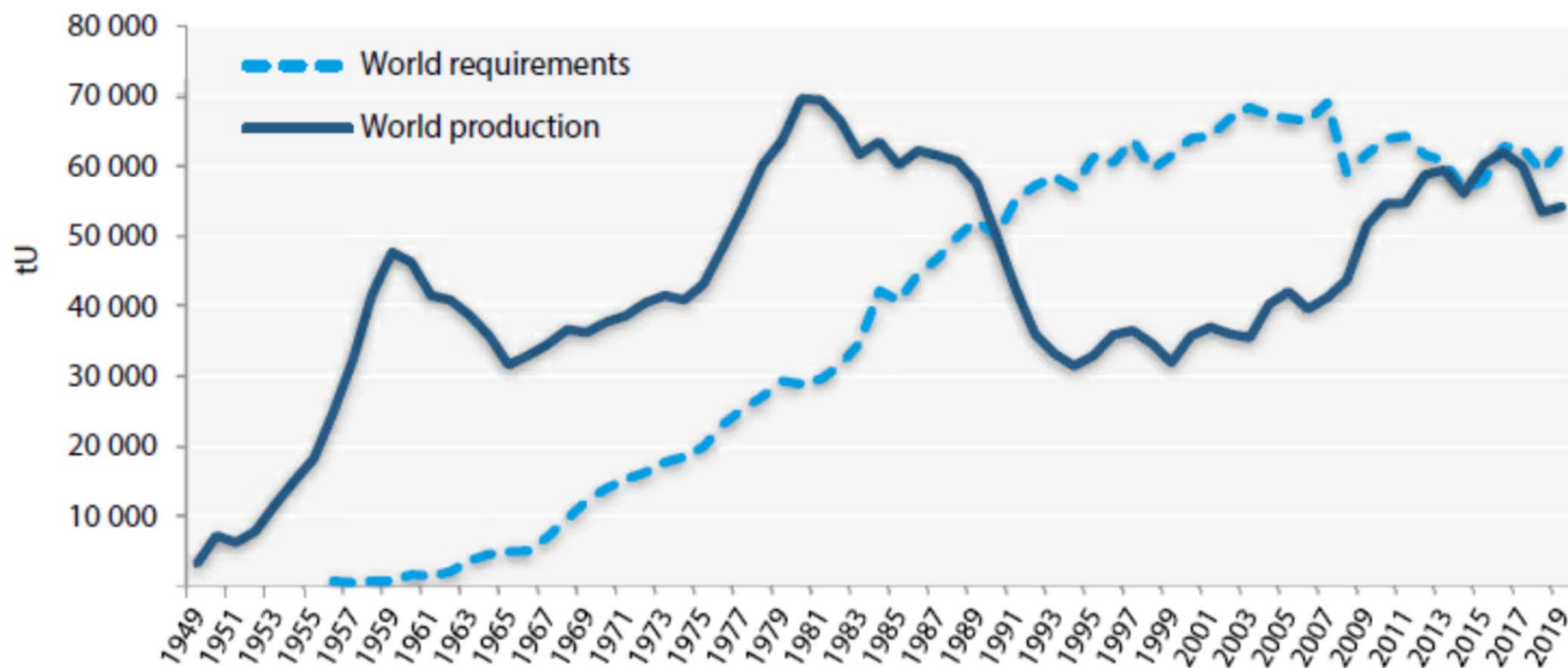
108 万トン

- ◇ 「可採年数」の評価は様々
需要を例えば 6万トン/年
として 34年~**135年**



ウランの需要と生産の推移

- ウランの採掘（販売用の U_3O_8 の生産）と需要は短期的には一致しない
- 生産は**原子力利用の拡大**を見越して行われ、その結果**在庫が過剰**となれば、需要と関係なく縮小される

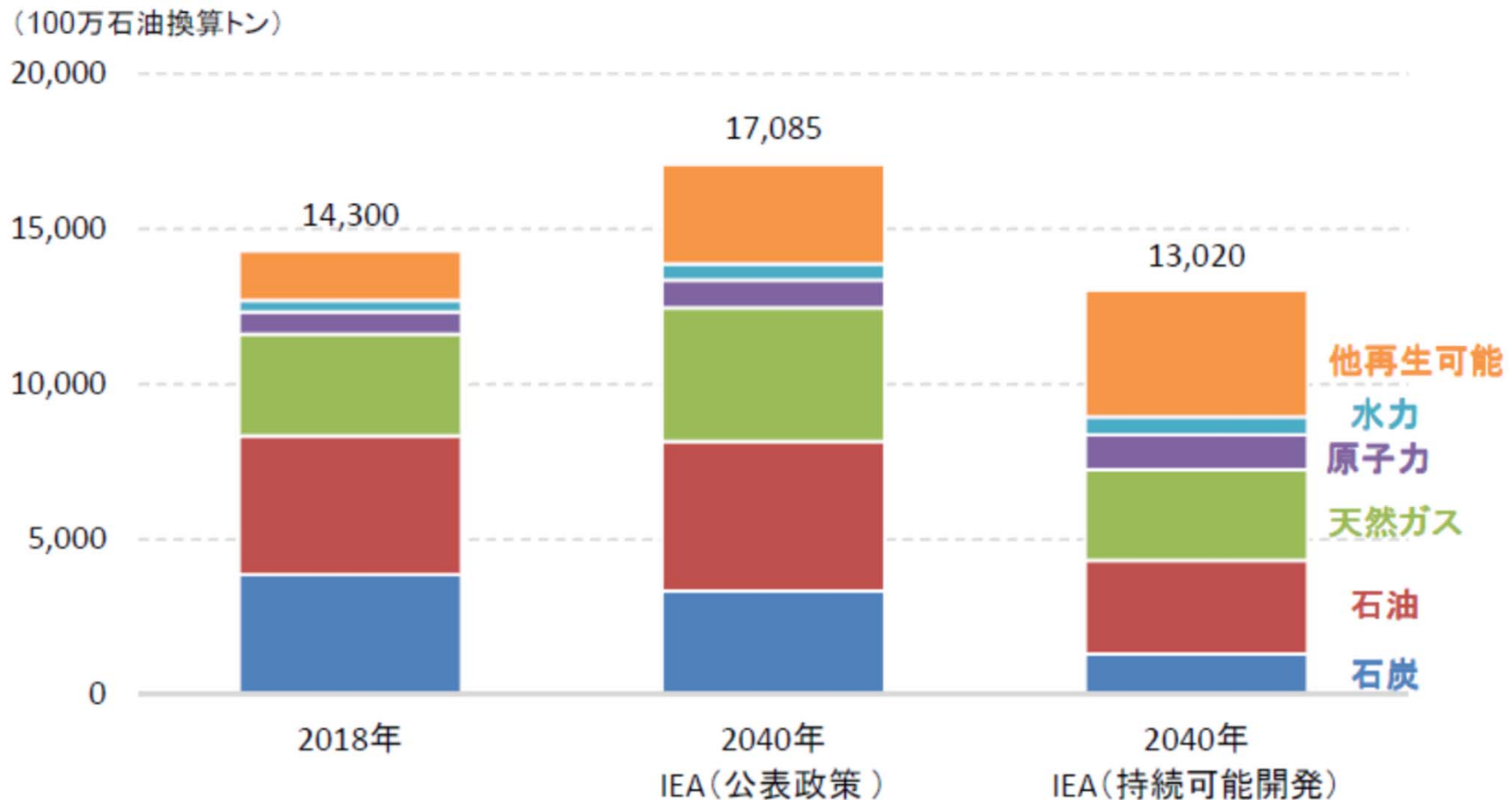


将来の世界のエネルギー需給予測(1)

- 国際エネルギー機関(IEA) は4つの将来シナリオを想定
 - ◇ **公表政策シナリオ** (Stated policies scenario) は、GHG削減目標など現在発表されている各国の政策目標が達成され、既存技術の進展が続くケース
 - ◇ **回復遅延シナリオ** (Delayed recovery scenario) ; 2023年に現状レベル回復
 - ◇ **持続可能開発シナリオ** (Sustainable development scenario) は、気温の上昇を2°Cより十分に下げるために必要な措置を「**逆算した**」シナリオ
 - ◇ **2050年実質ゼロ排出シナリオ** (NZE2050)
- 2040年の世界の一次エネルギー消費量は2018年比で;
 - ◇ 公表政策シナリオ(STEPS)では 1.19倍
 - ◇ 持続可能開発シナリオ(SDS)では 0.91倍
 - ◇ つまり、世界の国々がパリ協定の下で約束したGHG排出削減目標(**公表政策シナリオ**)では「**2°C目標**」に届かないことが歴然
- STEPS、SDS、NZE2050の順に気候変動対策が強くなる
 - ◇ **再生可能エネルギー**や**原子力**は、いずれのシナリオでも**増加**

将来の世界のエネルギー需給予測(2)

■ 国際エネルギー機関(IEA)による2040年のエネルギー需要予測



世界の原子力は将来増加すると予想

- 今後、**原子力先進国**では早期に運転開始した原発の退役が進むが、**新興国**の多くが経済発展に向け原発導入を計画
- 権威ある多くの機関が、2050年頃の原子力の大幅増加を予想
 - ◇ 現状(2019年末)は、**392 GW**
 - ◇ 国際原子力機関(IAEA)
 - High Projection; 2050年に **715 GW** (1.82倍)
 - Low Projection; 2050年に 363 GW (0.93倍)
 - ◇ 国際エネルギー機関(IEA)の世界エネルギーアウトルック(WEO)
 - 2040年に **500 GW以上**
 - ◇ 米国エネルギー省(DOE)のエネルギー情報局(EIA)の予想
 - 2050年に **500 GW程度**
 - ◇ 日本エネルギー経済研究所(IEEJ)の予想
 - 2050年に **500 GW以上**
 - ◇ IPCCの1.5°C目標の特別報告書
 - 排出経路のシナリオによって、2050年に 現状程度～**最大500%**(2010年比)

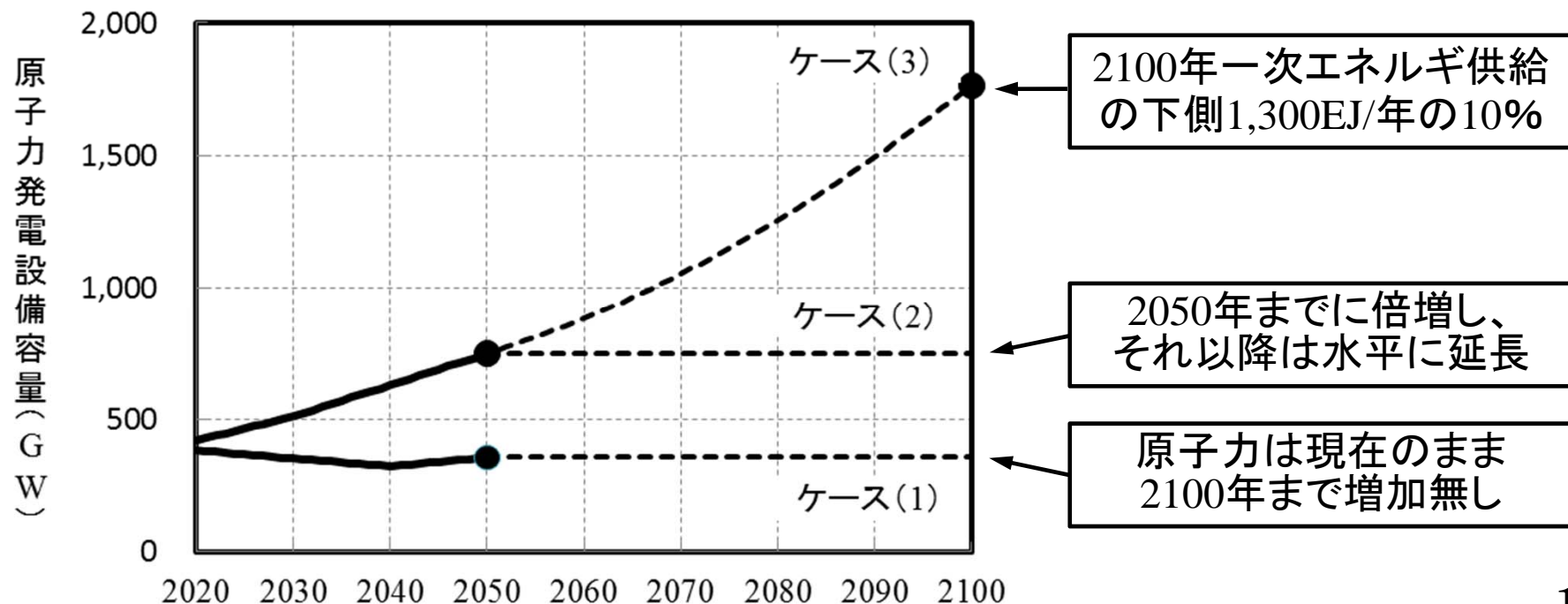
世界の原子力発電容量の仮定

■ 今世紀中の原子力規模として 3ケースを仮定

ケース(1) 現在の規模のまま増えない

ケース(2) 2050年までに倍増し、その後2100年まで増えない

ケース(3) 2050年までに倍増し、その後IPCC/AR5による2100年の一次エネルギー総供給の幅(1,300 EJ/年~1,800 EJ/年)の下側をとり**その10%**を原子力で供給するとして延長(現在の原子力設備の**4.5倍**)



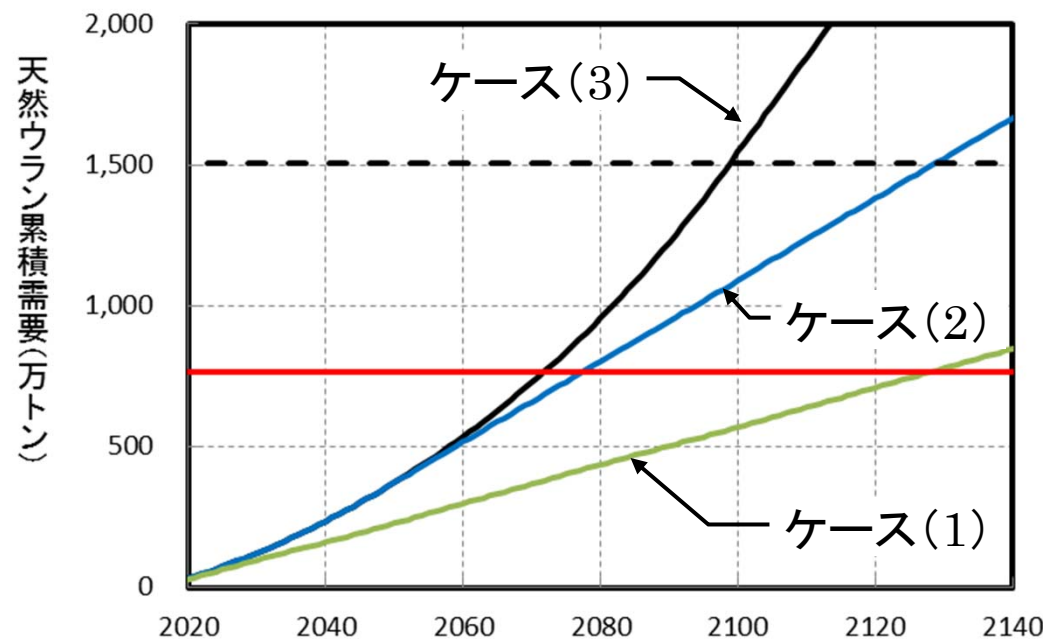
世界の天然ウラン累積需要の見通し

■ 確認埋蔵量807万トンとの比較；

- ◇ 原子力が**現状固定**でも、**2100年代の早期**(2130年より前)に使い切る
- ◇ 2050年に**倍増し以後固定**では、**2080年**に使い切る

■ 未発見資源を含む1,529万トンとの比較；

- ◇ 2050年に**倍増し以後固定**でも、**2100年代の早期**(2130年頃)に使い切る
- ◇ 2100年に**現状の4.5倍**を目指すケースで**今世紀中に**使い切る



← 未発見の予測資源
(期待資源)も含む
1,529万トン

← 既知資源量807万トン
(<100 US\$/lbU₃O₈)

ウラン資源量はOECD/NEAと
IAEAが毎年共同で発行する
Red book 2020年版より

軽水炉の天然U利用率

■ 濃縮ウランを得るのに必要な天然ウラン供給量の計算

UF₆ (六フッ化ウラン) 全体量の収支 $F = P + W$

²³⁵UF₆ (六フッ化ウラン235) の収支 $F \cdot x_f = P \cdot x_p + W \cdot x_w$

この連立方程式を解けば製品Pを作るのに必要な天然ウラン量が求まる

$$F \cdot x_f = P \cdot x_p + (F - P) \cdot x_w \quad \rightarrow \quad F \cdot (x_f - x_w) = P \cdot (x_p - x_w)$$

$$F/P = (x_p - x_w) / (x_f - x_w)$$

例えば、新燃料製品濃縮度4.5%、天然ウラン0.711%、廃品濃縮度0.25%とすると $F/P = (4.5 - 0.25) / (0.711 - 0.25) = 9.22$

つまり、**低濃縮ウラン燃料**を作るために**約10倍の天然ウラン**が必要

■ 完成した低濃縮U燃料から取出せるエネルギー（取出燃焼度）は45,000MWd/t程度でしかなく、**燃焼率は4.5%**

◇ 1gの核分裂で1MWdのエネルギー発生（200MeV/fissionより）

◇ 10倍の天然Uを使って作った燃料が、その内の5%程度しか燃えない

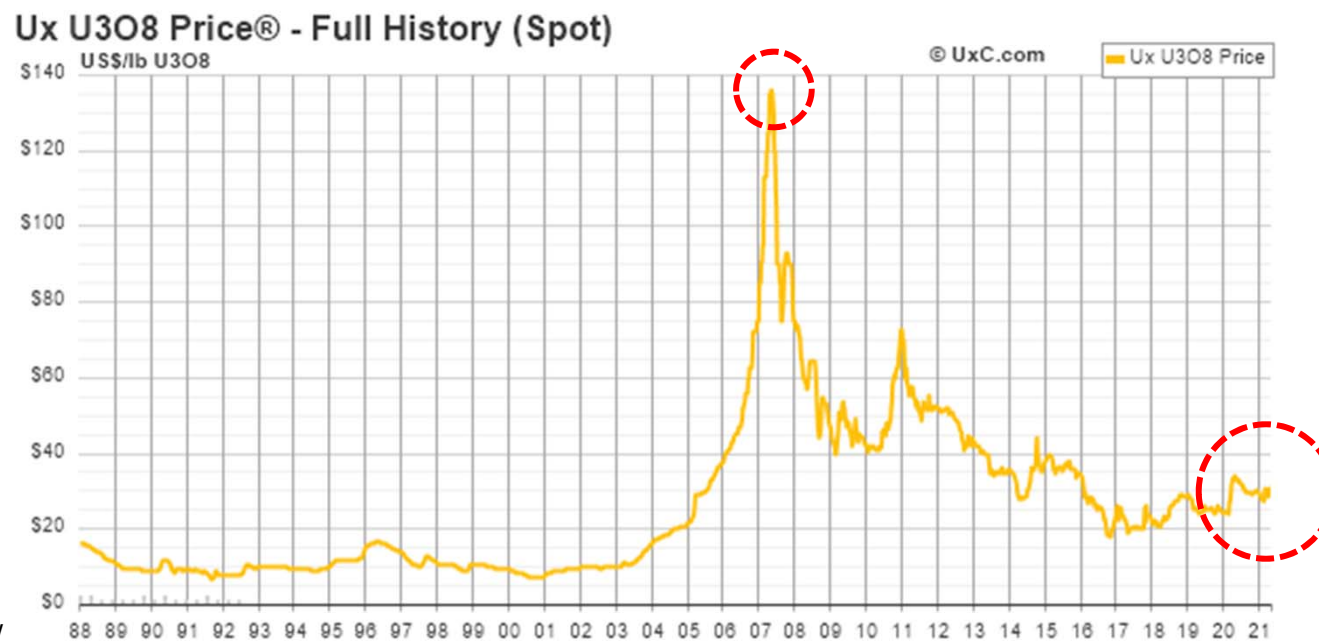
■ 転換工程でも0.5%、成形加工で2.5%程度のロスあり

■ 総合して**天然Uの利用率は0.5%程度**（燃える量の200倍が必要）

$$1/9.22 \times 0.97 \times 0.045 = 0.0047$$

ウラン資源価格の推移 (USD/lbU₃O₈)

- ひとたび需給が逼迫すればトレーダが入り急騰する市場
 - ◇ 1980年代後半～2000年代初頭は 10 US\$/lbU₃O₈程度
 - ◇ 2003年頃から価格上昇し、2007年には**一時期 136 US\$/lbU₃O₈**
 - ウラン鉱山の出水事故などで供給不安が高まったために急騰
 - 解体核高濃縮ウランからの供給や民間在庫取崩し等の二次供給の減少
 - ◇ その後、リーマンショックによる世界的な経済の停滞で下降するも、中国等によるウラン精鉱の大量購入で世界的なウラン獲得競争が激化
 - ◇ 福島事故後に低下したが底値感あり近年は**漸増 (30 USD/lbU₃O₈)**



Source: UxC, LLC
<http://www.uxc.com/>

プルサーマルの資源節約効果

■ 軽水炉の使用済燃料の組成

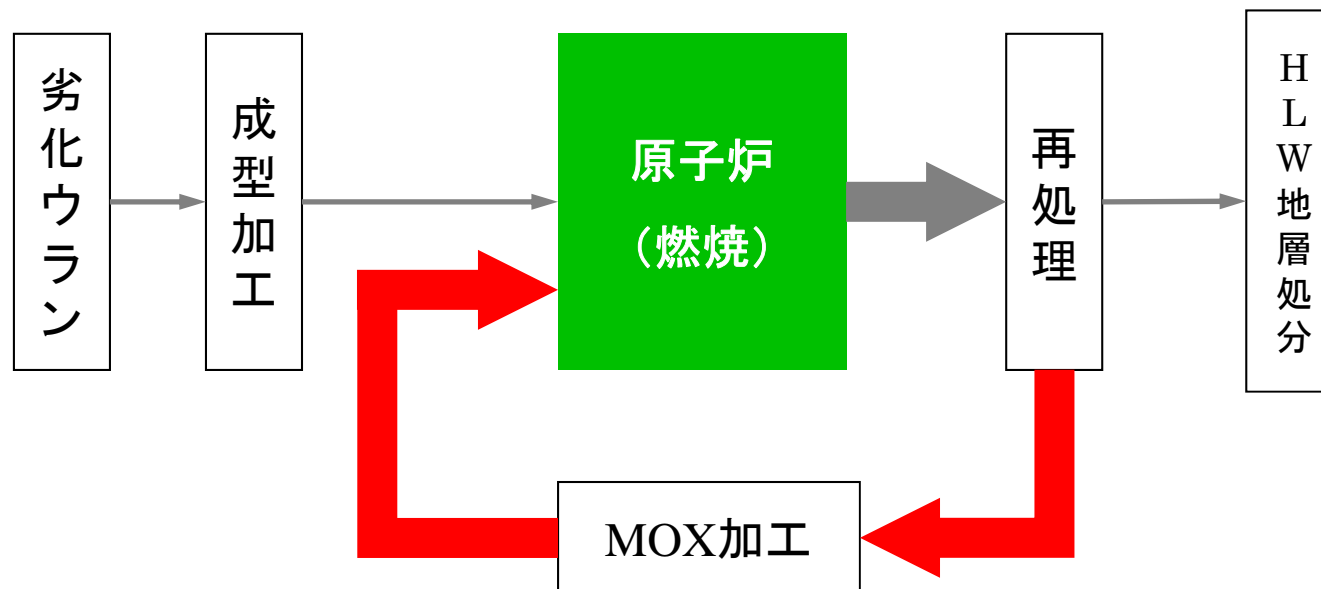
- ◇ 4.5%の原子核が核分裂(燃焼率 4.5%)し、核分裂生成物となった
 - 3%は、ウラン原子核(主として ^{235}U)が直接に核分裂
 - 1.5%は、 ^{238}U がプルトニウムとなってから核分裂したもの
- ◇ 従って、5%弱が、高レベル廃棄物(核分裂生成物とマイナーアクチナイド)
- ◇ 一方、プルトニウム(全Pu)が約0.9%、**核分裂性Puが約0.6%**が発生
- ◇ ウラン(全U)が94%強、 **^{235}U が1%**程度残る(天然ウラン近くまで劣化)

■ 使用済燃料を再処理して軽水炉燃料を再生

- ◇ プルトニウムを回収して、軽水炉用のMOX新燃料を作る → **プルサーマル**
 - 核分裂性Puの含有率(富化度)を5%程度とすれば、 $0.6\% \div 0.05 = 12\%$
 - 即ち、**12%のウラン新燃料の節約**となる
- ◇ ウランを回収して再濃縮して新燃料を作る → **回収ウラン利用**
 - 94%残るウランを ^{235}U 濃縮度4.5%に再濃縮(廃品濃度0.25%)すると想定
 - F/Pで除して $0.94/9.22 = 0.10$ より、**10%程度のウラン新燃料の節約**となる
- ◇ **合計 22%**の資源節約; 軽水炉での核燃料リサイクルの効果はこの程度

高速炉の核燃料サイクル

- 高速増殖炉は、エネルギーを発生しつつ、消費した燃料物質よりも多くの新しい燃料物質を作り出すことができる
 - ◇ **増殖比を1.0強** にして、リサイクル中のロスがあってもPu燃料を自給
 - ◇ **上流からは、ブランケットで消費した²³⁸Uを補う分だけ劣化Uを供給**
 - ◇ 劣化Uは濃縮の廃品として既に大量に蓄積（国内にも9,000トン；400年間分）
 - ◇ **新しいウランの調達量を極端に減らすことが可能；実質的にゼロ**



天然ウラン資源の利用率の比較

■ 軽水炉のワンス・スルー（使用済燃料は再処理せず直接処分）

◇ 天然ウランの²³⁵U濃度 0.711%、濃縮工程の製品濃縮度 4.5%、廃品濃度を 0.25% として；

➢ 原料・製品比率 $F/P = (4.5 - 0.25) \div (0.711 - 0.25) = 9.219$

◇ 転換ロス 0.5%、加工ロス 2.5%、燃焼率 4.5% として；

➢ 天然ウラン利用率 = $1 \div 1.005 \times 0.975 \div 9.219 \times 0.045 = 0.0047 \rightarrow$ **約 0.5%**

■ 軽水炉のリサイクル（1回だけリサイクル）

◇ プルサーマルと回収ウラン利用の合計で **22%の資源節約**の結果；

➢ $0.005 \times 1.22 = 0.006 \rightarrow$ **約 0.6%**

■ 高速炉のリサイクル（無限リサイクル）

◇ リサイクルロス 5%、取出燃焼度 100,000MWd/t（燃焼率10%）として；

➢ 1回のリサイクルによる燃料の再生は $(1 - 0.1) \times 0.95 = 0.855$

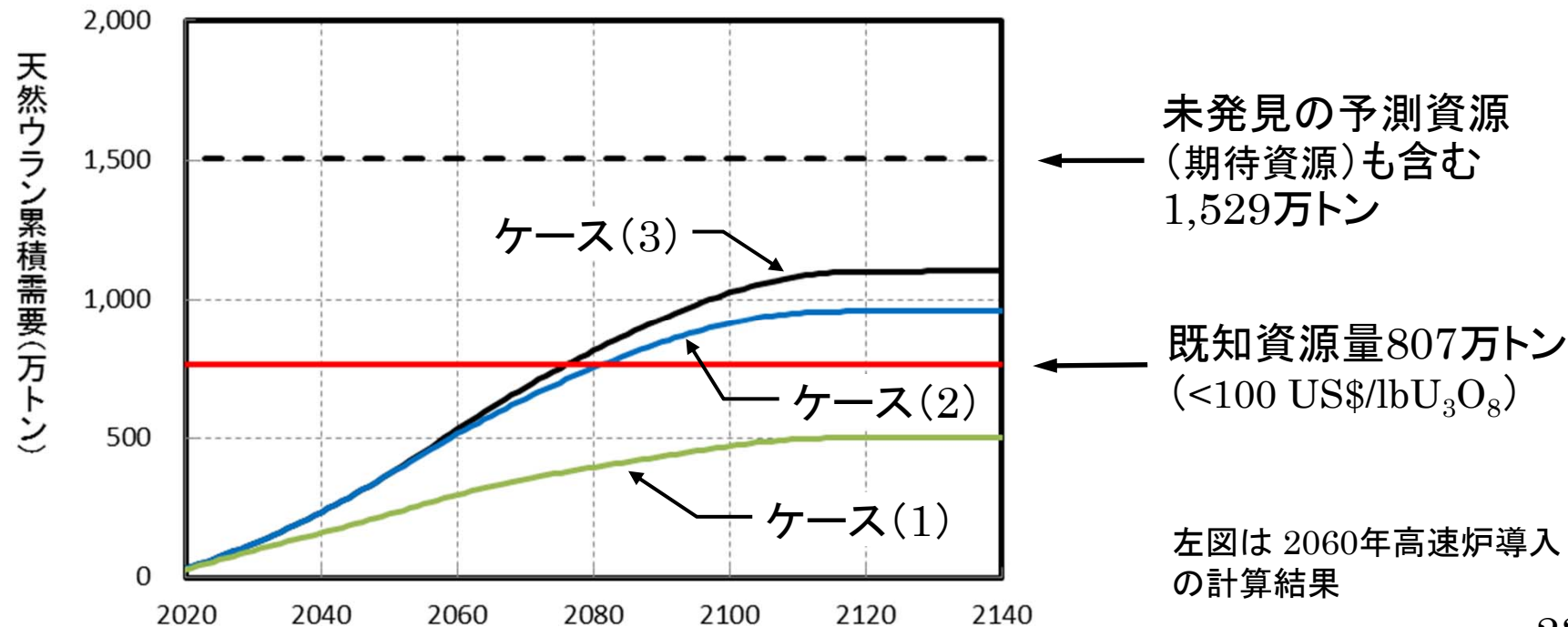
◇ 無限リサイクルによるウラン資源の利用率は；

➢ $0.1 + 0.855 \times 0.1 + 0.855^2 \times 0.1 + 0.855^3 \times 0.1 + 0.855^4 \times 0.1 + \dots$
 $= 0.1 \div (1 - 0.855) = 0.69 \rightarrow$ **約70%**

◇ 天然ウランの**利用可能年数は100倍**に延びる

高速炉とその燃料サイクルの効果

- 高速炉とその核燃料サイクルは、天然ウラン需要を劇的に縮小
 - ◇ **今世紀の後半、新規建設を全て高速炉**とし核燃料サイクルと組み合わせれば、温暖化抑止の観点で原子力の役割が大幅に高まっても、天然U需要は現在の確認埋蔵量を超えても大幅に抑制される
 - 高速炉の導入期にはPu増殖させ、安定期には増殖比 ≈ 1 とする
 - ◇ **価格上昇に対する抑制策**となり、残存する軽水炉を助ける)



天然ウランの利用可能年数

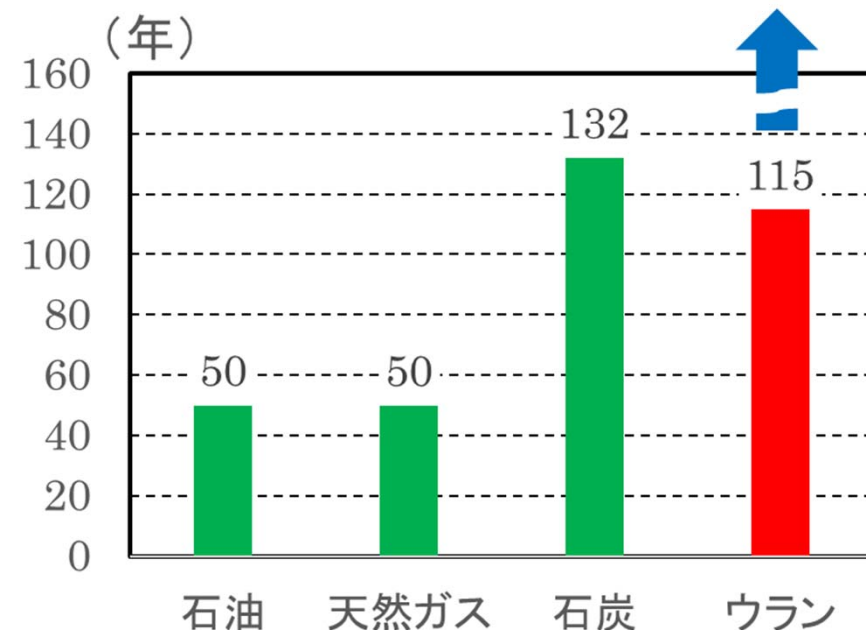
■ 天然ウランは $^{235}\text{U} : ^{238}\text{U} = 0.7\% : 99.3\%$

◇ 利用可能年数(可採年数) = 確認可採埋蔵量 ÷ 現在の年間生産量

◇ ^{235}U しか使わなければ、燃料加工段階などでロスがあるため、天然Uの0.5%程度しか利用できず、その利用可能年数(=可採年数)に、火力発電用の化石燃料の可採年数と比べ優位性がない

◇ しかし ^{238}U をPuに変えて使えば、天然Uの利用可能年数は100倍程度に延び、実質的に資源制約から解放

	天然ウランの利用率	利用可能年数
軽水炉 (ワンスルー)	0.5 %	約100年
軽水炉 (プルサーマル)	0.6 %	約120年
高速増殖炉	70 %	数千年



世界の高速炉開発の実績と現状

■ 先に原子力発電の商業化に成功したのは熱中性子炉

- ◇ 黒鉛炉(ソ連)、ガス炉(英国)、軽水炉(米国)、重水炉(カナダ); 1950~60年代
- ◇ 燃料サイクルも軽水炉のプルサーマルが先行し各国で拡大
 - 仏、独、スイス、ベルギー、米国、等々 日本は重水炉ふげんもMOX

■ 一方、原子力の将来は高速増殖炉が本命であるから、先進各国は競ってNa冷却高速炉の**実験炉、原型炉などを多数建設**

- ◇ **米(7+1基)、英(2基)、露(8基)、仏(3+1基)、独(1+1基)**
- ◇ 1951年に世界で初めて原子力で電気を灯したのは米国Na冷却EBR-1
- ◇ 化石燃料の枯渇もウラン価格の上昇も無く、また米国の核不拡散政策もあり、高速炉は実用化されず多くの実験炉は閉鎖されたが、**経験は蓄積済み**

■ **現在はロシアと新興国**が高速炉開発に熱心

- ◇ 露(実験炉BOR-60、原型炉BN-600、実証炉BN-800、実用炉BN-1200計画)
- ◇ 印(実験炉FBTR、原型炉PFBR、実用炉CFBRを6基計画)
- ◇ 中(実験炉CEFR、実証炉CFR600建設中)
- ◇ 韓(原型炉PGSFR計画; 米国が支援)

露・印・中は2030年代
の商業炉導入を目標
(下線は既に運転中のもの)

まとめ(世界の原子力の将来)

- 今世紀の後半、世界の原子力は増える
 - ◇ **原子力先進国**では早期に運転開始した原発の退役が進むが、**新興国**の多くが経済発展に向け原発導入を計画しており、若干の時間遅れはあったとしても、世界合計の原子力は今後増える
 - ◇ 脱炭素の道を模索する国際機関の回答は原子力の拡大を織り込む
- 従って、対策を打たなければ**ウラン資源価格**が上昇する
 - ◇ ウランの市場価格は需要・景気を見越して素早く変動する
- 原子力の利用は ^{238}U をPuに変えて資源量を圧倒的に増やせることにこそ意義がある
 - ◇ 原子力の開発当初、**先進国**は高速炉の**技術を獲得済み**
 - ◇ 現在は、**ロシア、中国、インド**が高速炉の開発を推進
 - ◇ **米国**も高速炉開発に復帰する方向(VTR、ARDP)
- 世界の原子力は**今世紀後半、高速炉に移行**して行くこと必至

日本の原子力の現状

日本の商業用発電炉の建設実績

■ これまでに建設した全数

◇ **57基** 5,065.8 万kW (1 GCR、32 BWRs、24 PWRs) including 4 ABWRs

■ 2011年東日本大震災の直前

◇ それまでに 3 基を廃炉； 東海1号(GCR)、浜岡1号・2号(2 BWRs)

◇ **運転中は 54基** 4,911.2 万kW (30 BWRs、24 PWRs) including 4 ABWRs

◇ 2010年の総発電電力量の内、原子力 28.6%

■ 東日本大震災以降の廃炉

◇ **21基** 1587.7 万kW (13 BWRs、8 PWRs)

➢ 6 BWRs； 福島第一の事故炉4基(1~4号)+2基(5・6号)

➢ 7 BWRs； 敦賀1号、島根1号、福島第二1~4号、女川1号

➢ 8 PWRs； 美浜1・2号、玄海1・2号、伊方1・2号、大飯1・2号

■ 現在 **33基**

◇ 3,323.5 万kW (17 BWRs、16 PWRs) including 4 ABWRs

(参考)建設工事中 ABWR **3基** 合計414.1 万kW

島根3号(137.3 万kW)、大間(138.3 万kW)、東京東通1号(138.5万 kW)

これらが加われば、**36基** 3737.6 万kW

原発再稼働の進捗状況

■ 再稼働したものが **10基** (全てPWR)

◇ 川内1・2号、玄海3・4号、伊方3号、高浜3・4号、大飯3・4号、美浜3号

■ 新規制基準への適合性審査に**合格**したものの、**未稼働**は **6基**

◇ PWR(2基); 高浜1・2号

◇ BWR(3基); 柏崎刈羽6・7号、東海第二、女川2号

■ 新規制基準適合性の**審査中**の原子炉は **11基**

◇ 既設10基 PWR(3基); 泊1・2・3号

◇ BWR(7基); 東北東通1号、浜岡3・4号、志賀2号、
敦賀2号、島根2号

◇ 新設 2基 BWR(2基); 島根3号、大間

(ここまでの合計 **27基**)

■ **未申請**は **9基** (全てBWR)

◇ 既設 8基; 女川3号、柏崎刈羽1~5号、浜岡5号、志賀1号

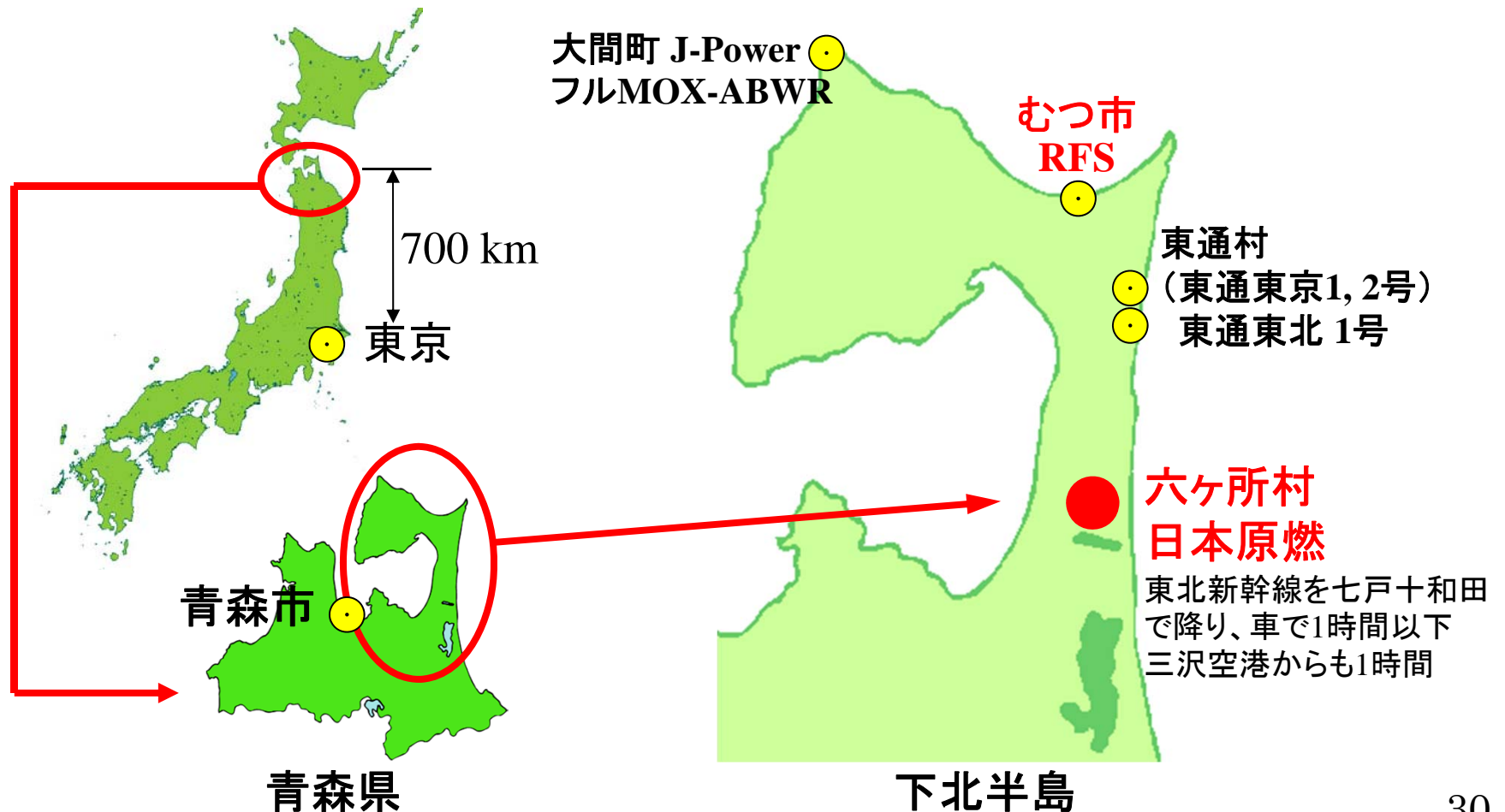
◇ 新設 1基; 東京東通1号

(総合計 **36基** = 既設33基 + 新設3基)

青森県に立地する原子力施設

■ 青森県下北半島には、核燃料サイクルの枢要施設が立地

六ヶ所村(再処理工場、MOX燃料工場、濃縮工場、廃棄物埋設・貯蔵施設)、むつ市(東電・原電の中間貯蔵施設)、東通村(東北電力のBWR原発)、大間(電源開発のフルMOX-ABWR)、等

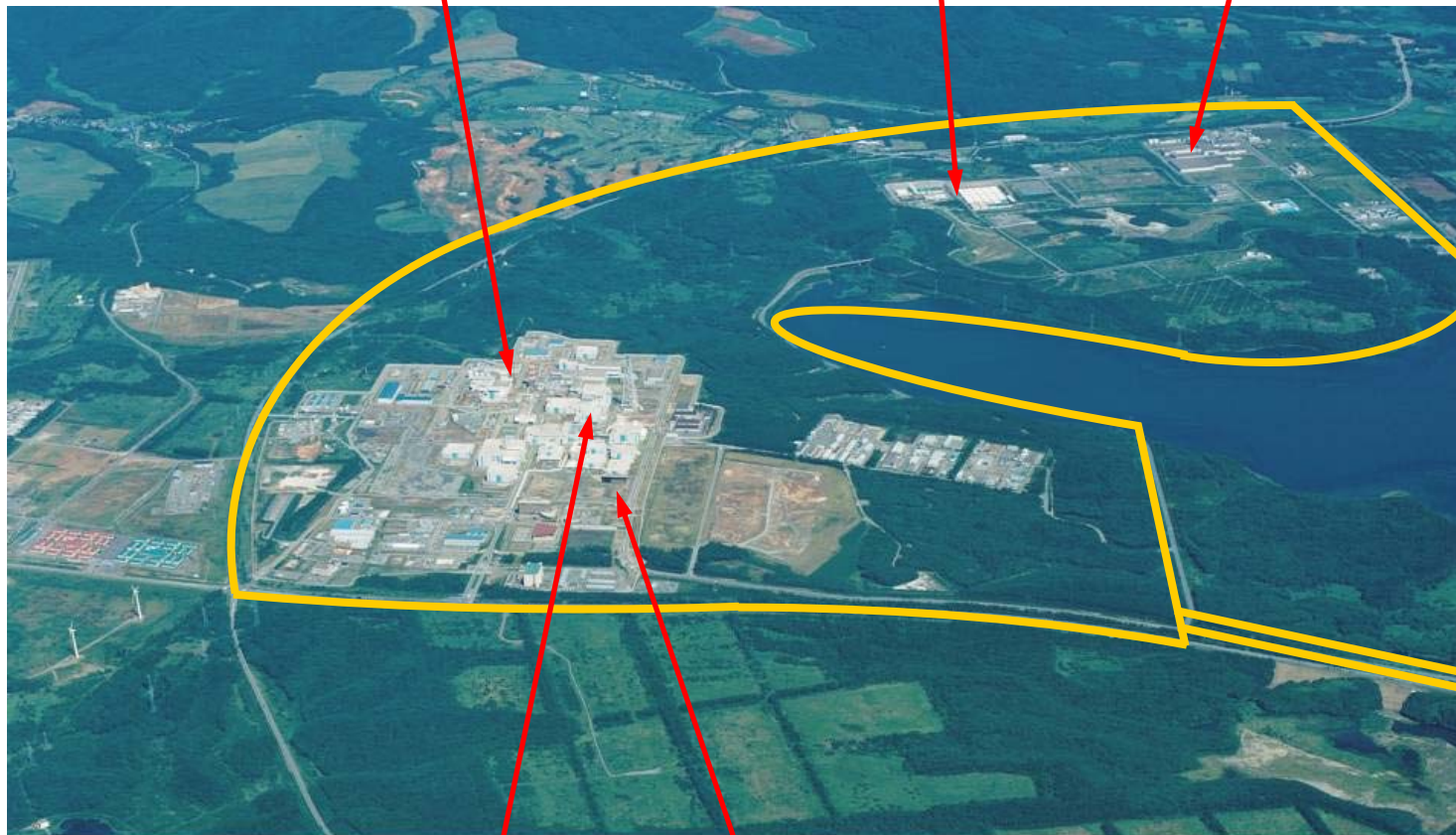


六ヶ所原子燃料サイクル施設

返還HLW管理センター

LLW埋設センター

ウラン濃縮工場



再処理工場

MOX燃料工場建設地点

むつ小川原
港へ



日本の原子力の将来

2030年の原発依存度 22～20%の実現方法

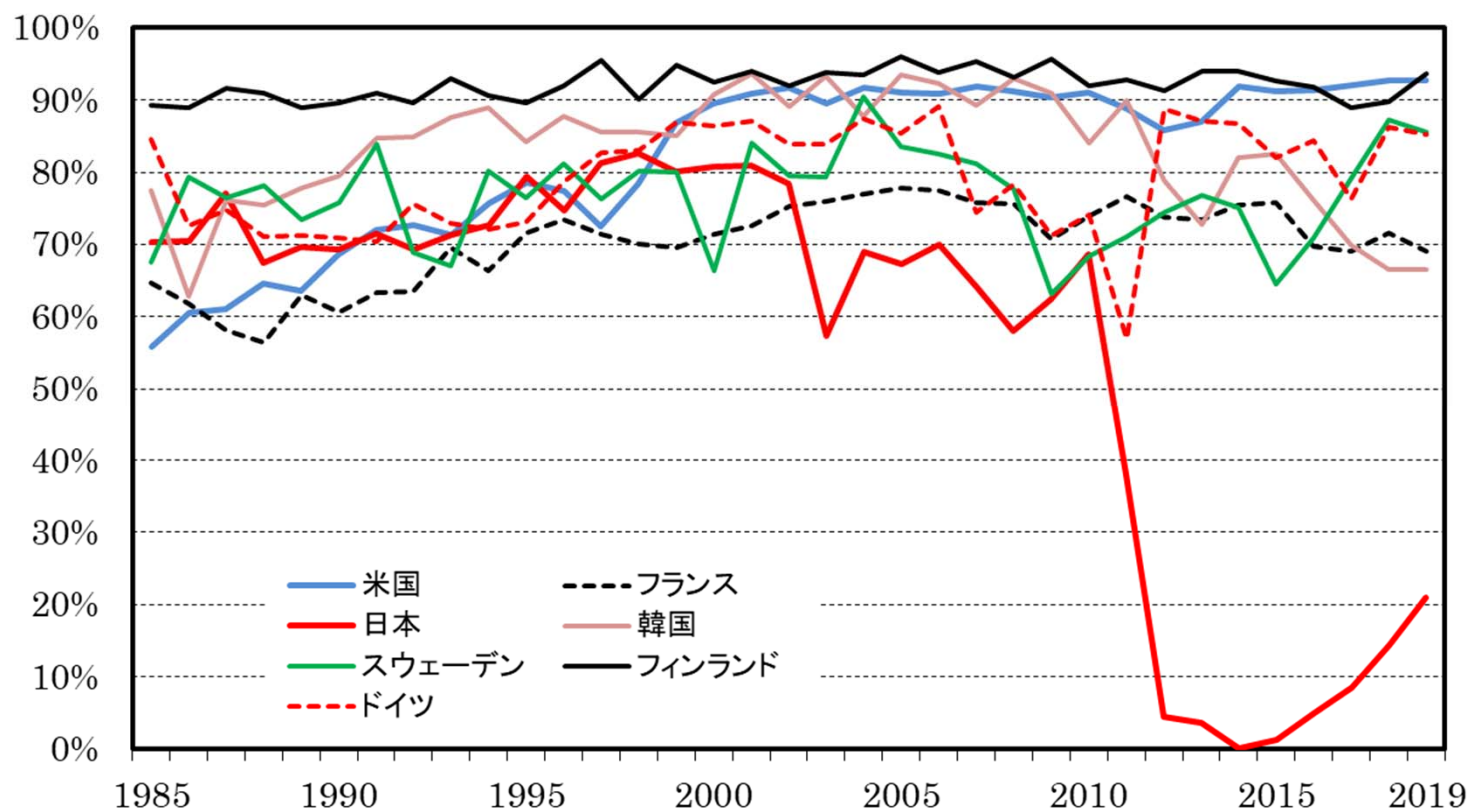
原発依存度22～20%を実現する基数

- **福島第一原発事故前**の原子力発電比率は2010年 28.6%
 - ◇ **運転中 54基** 4,911.2万kW (30 BWRs、24 PWRs) including 4 ABWRs
- **第5次エネルギー基本計画** (2018年7月3日閣議決定)
 - 「原発依存度を可能な限り低減させる方針の下で、確保していく規模を見極める」
 - ◇ **2030年**の発電電力量を想定 (**1兆650億kWh**) し、その**22～20%を原子力**
 - 根拠は実質経済成長率1.7%/年、一方省エネの徹底で17%の電力需要節減
 - ◇ 原子力比率を小さい側の20%と仮定し、利用率が**70%**では、少なくとも**3,600万kW**の原子力が必要 (所内率3.5%)
 - $(1兆650億kWh \times 20\%) \div (8,760 \text{ h/年} \times 70\% \times 0.965) \doteq 3,600 \text{ 万kW}$
 - ◇ 2030年までには10年間しかなく利用率が改善しても全国平均は高々**80%**程度と想定すると **3,150万kW**が必要
 - $(1兆650億kWh \times 20\%) \div (8,760 \text{ h/年} \times 80\% \times 0.965) \doteq 3,150 \text{ 万kW}$
 - ◇ 欧米先進国並みに **90%**が実現できると想定すれば **2,800万kW**が必要
 - $(1兆650億kWh \times 20\%) \div (8,760 \text{ h/年} \times 90\% \times 0.965) \doteq 2,800 \text{ 万kW}$
 - ◇ これらは、100万kW級原子炉 **28～36基**に相当するが、現在、再稼働申請済**27基**、可能性のある最大基数は**36基** (=27+8+1)

原子力先進国の設備利用率の推移

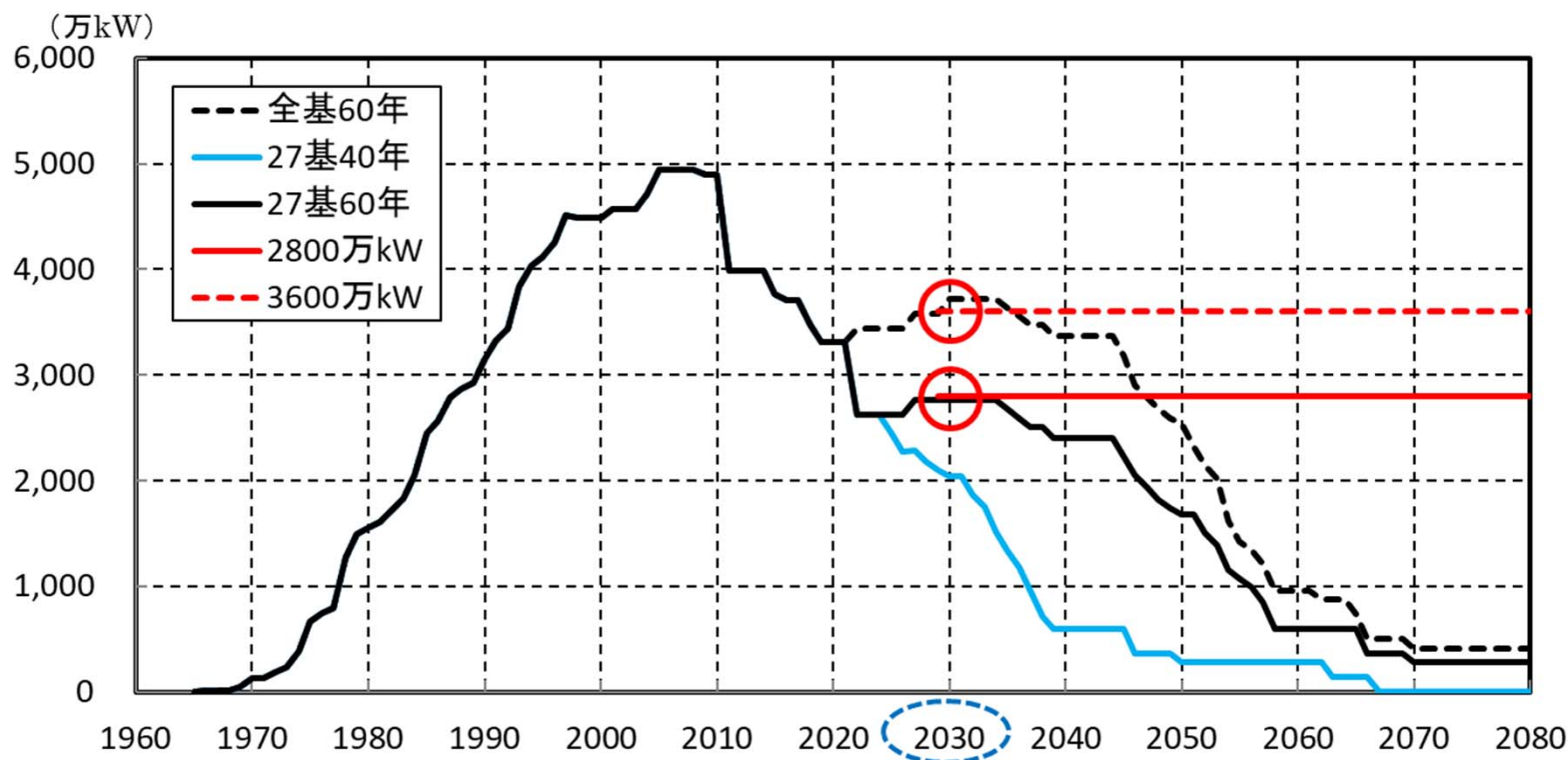
■ 原子力先進国の設備利用率は高い

- ◇ フィンランドは殆ど90%以上、米国も過去20年間90%程度
- ◇ 日本は福島第一事故の前でも、2000年代初頭を過ぎ70%以下で劣等生
- ◇ 日本は福島第一原発事故後は悲惨だが、世界は殆ど無関係



2030年原子力比率20%の見通し

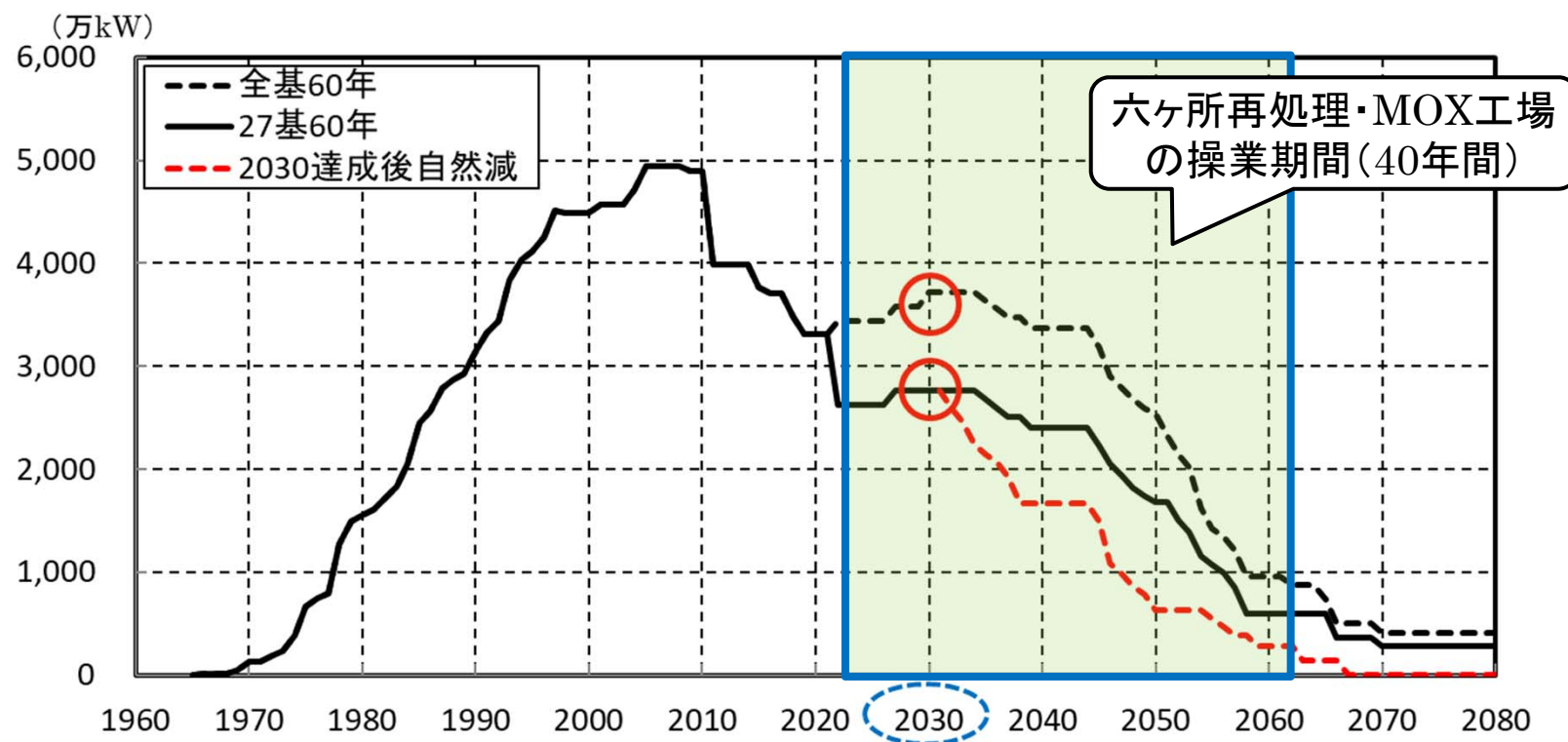
- 2030年1兆650億kWhの20%を原子力で供給するには;
 - ◇ 利用率70%なら3,600万kWが必要で、**36基(27+8+1)**を全て稼働し、**全基60年運転**が必須
 - ◇ 利用率90%なら2,800万kWが必要で、**申請済27基**だけでも、その**60年運転**でほぼ実現



**2050年の原発依存度を
可能な限り減らす影響**

2050年に向けて原発依存度低減 !?

- 2050年に向けて可能な限り原発依存度を低減するならば
 - ◇ 全基の再稼働は不要、**新規建設は申請済の2基だけで良い**
 - ◇ 60年運転への延長は2030年以前に40年に到達するものだけで良い
 - ◇ 27基程度で利用率90%を出せば、2030年目標は実現し、その後は自然減
 - ◇ **六ヶ所再処理・MOX燃料加工**は早晚製品の行き場を失い、**存在価値なし**



現エネ基は青森にとって耐え難いもの

■ 第5次エネ基は、青森にとって矛盾だらけ

◇ 2050年で原発を無くすならば;

- 六ヶ所再処理・MOX工場は操業開始後20年程度で**製品の行き場が無い**
- 六ヶ所再処理に続く**第二再処理工場は有り得ない**
- その結果、**むつRFS**で中間貯蔵される使用済燃料の**行き先も無い**
- **大間、東京東通1号**の使用済燃料も**行き先が無い**
- 原発が無くなるならば、**ウラン濃縮工場の拡大も意義が薄れる**

(新型遠心機は第一世代だけで、その後の改良・リプレース・増設は不要)

◇ プルトニウム保有量を減らす方針は;

- そもそも**六ヶ所再処理の稼動を困難にするもの**

◇ 前原子力委員長は「ウラン資源は枯渇しない」と発言

- **六ヶ所再処理の存在意義を否定するもの**

◇ 放射性廃棄物の仕事だけが延々と続く!?

- **英仏からの廃棄物返還**は今後も続き、管理期間終了は2050年を大きく超過
- **低レベル廃棄物の埋設処分**は、最後の原発の廃炉工事終了まで続く

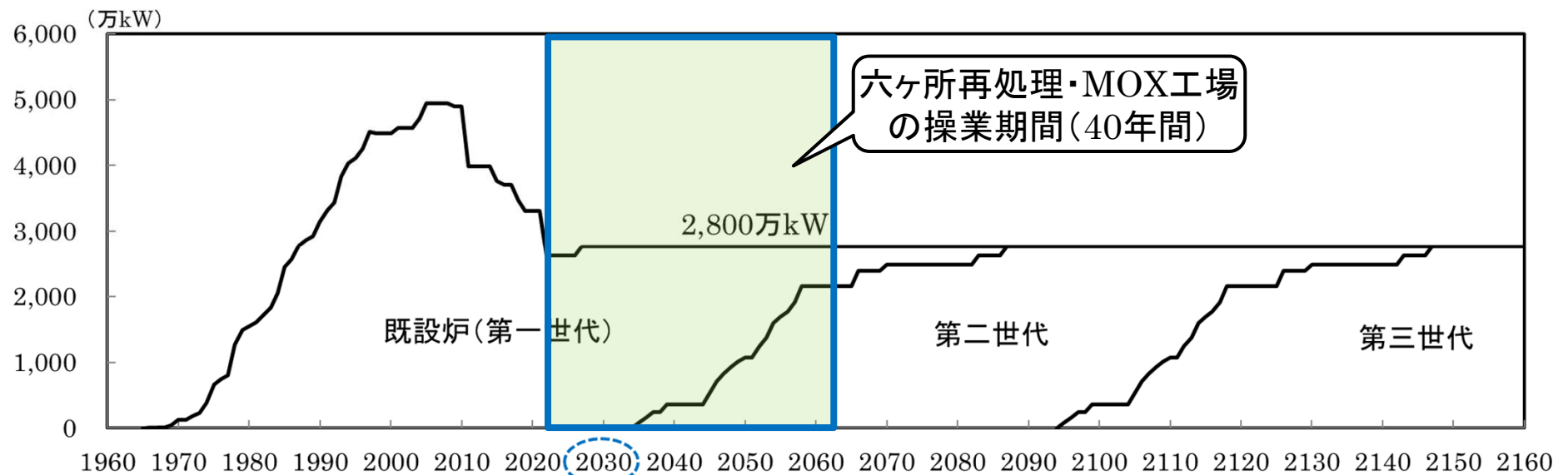
怒!

■ 青森県に展開する原子力プロジェクト(原子力発電所、核燃料サイクル、SF中間貯蔵)を困難化する政策は、我が国全体の原子力を短命に終わらせ、将来世代を危機に陥れる

2050年以降も原子力発電 を維持する方法

原子力の維持と六ヶ所再処理

- 順次リプレースして一定規模の原子力を永続的に維持
 - ◇ 27基2,800万kWを利用率90%で60年運転
 - ◇ 2040年頃までに新增設プラントの運転開始が必要
- 再稼働できた電力会社が3社にとどまる中、全社が今すぐ新增設に取り組まないと間に合わない



既設炉60年での高速炉導入

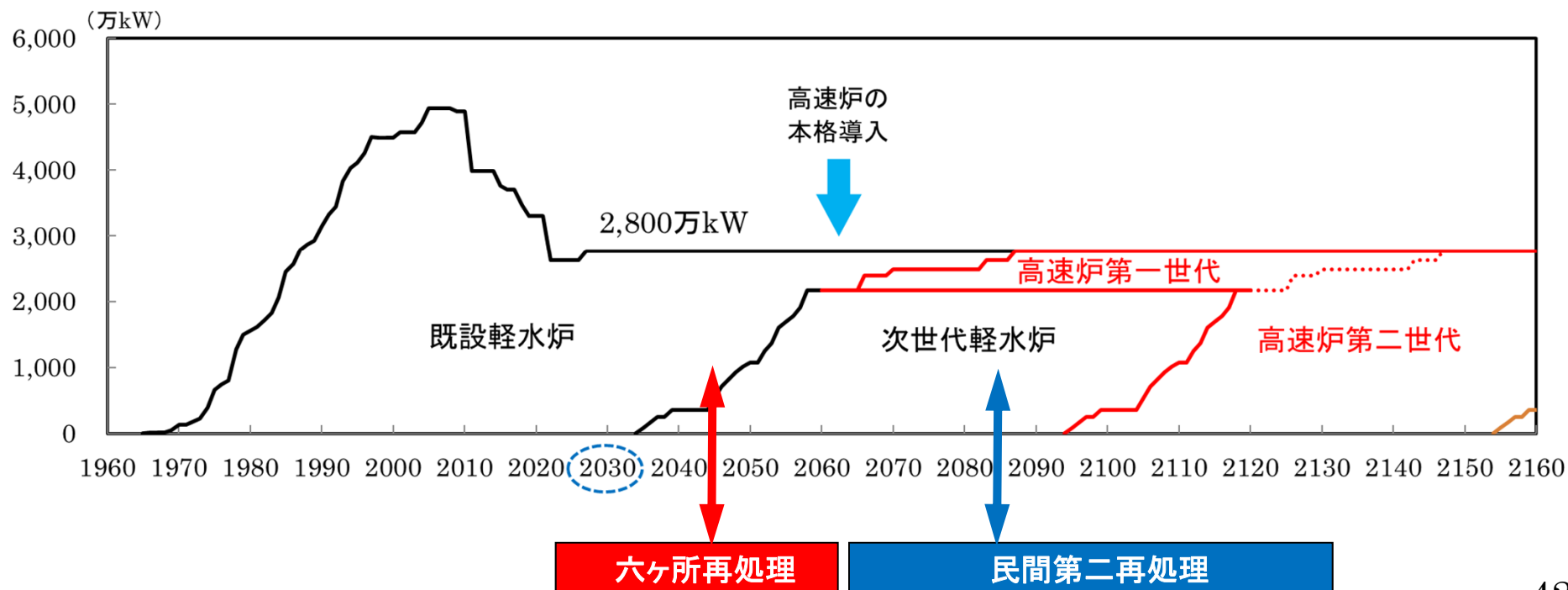
■ 原子炉の供用期間を60年とし、一定規模(2,800万kW)を維持

◇ **高速炉の本格導入**は、恐らく既設軽水炉のリプレイスに**間に合わない**

■ 殆どの原子炉が軽水炉でリプレイス

◇ 今世紀中、高速炉は少数派に留まり、我が国の原子力は今世紀後半のウラン価格高騰の影響をまともに被ることになる

◇ 民間第二再処理の役目も軽水炉使用済燃料の再処理が殆ど



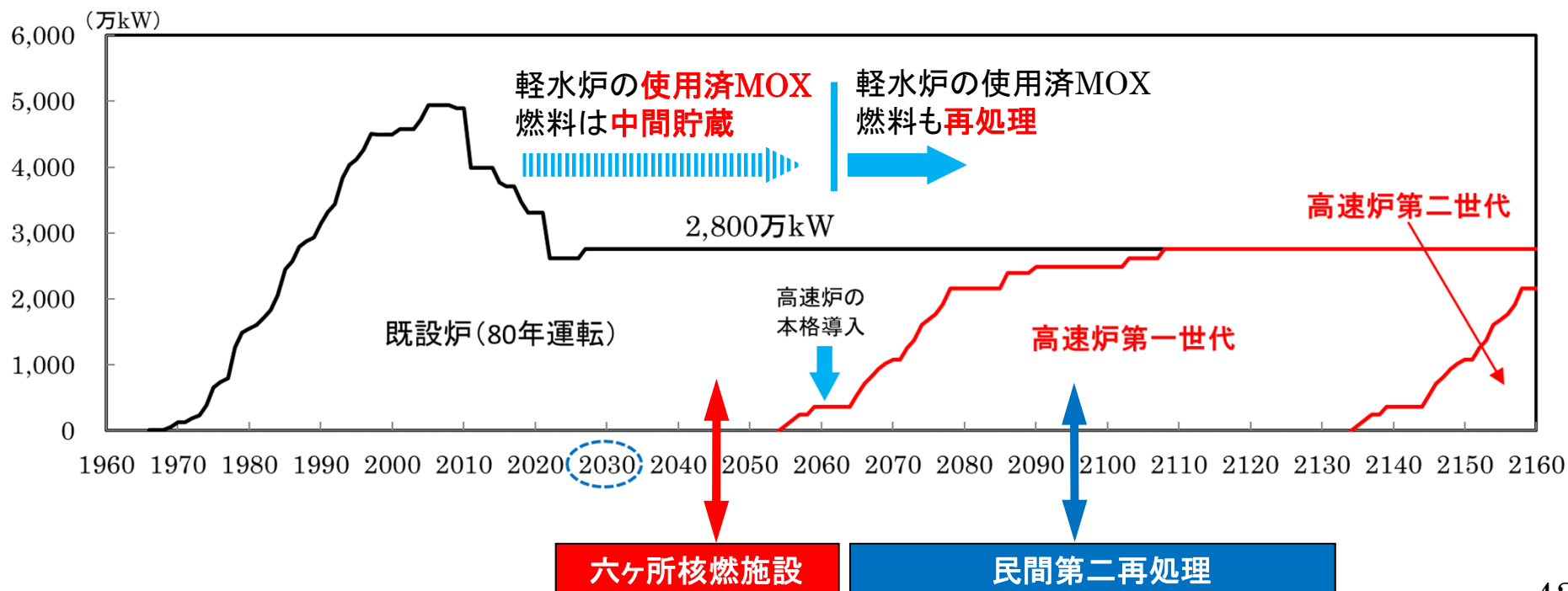
既設炉80年での高速炉導入

■ 原子炉の供用期間を80年とし、一定規模(2,800万kW)を維持

- ◇ 既設軽水炉のリプレイスは 2060年過ぎに本格化
- ◇ 高速炉とその核燃料サイクル技術の開発に**時間的余裕**あり

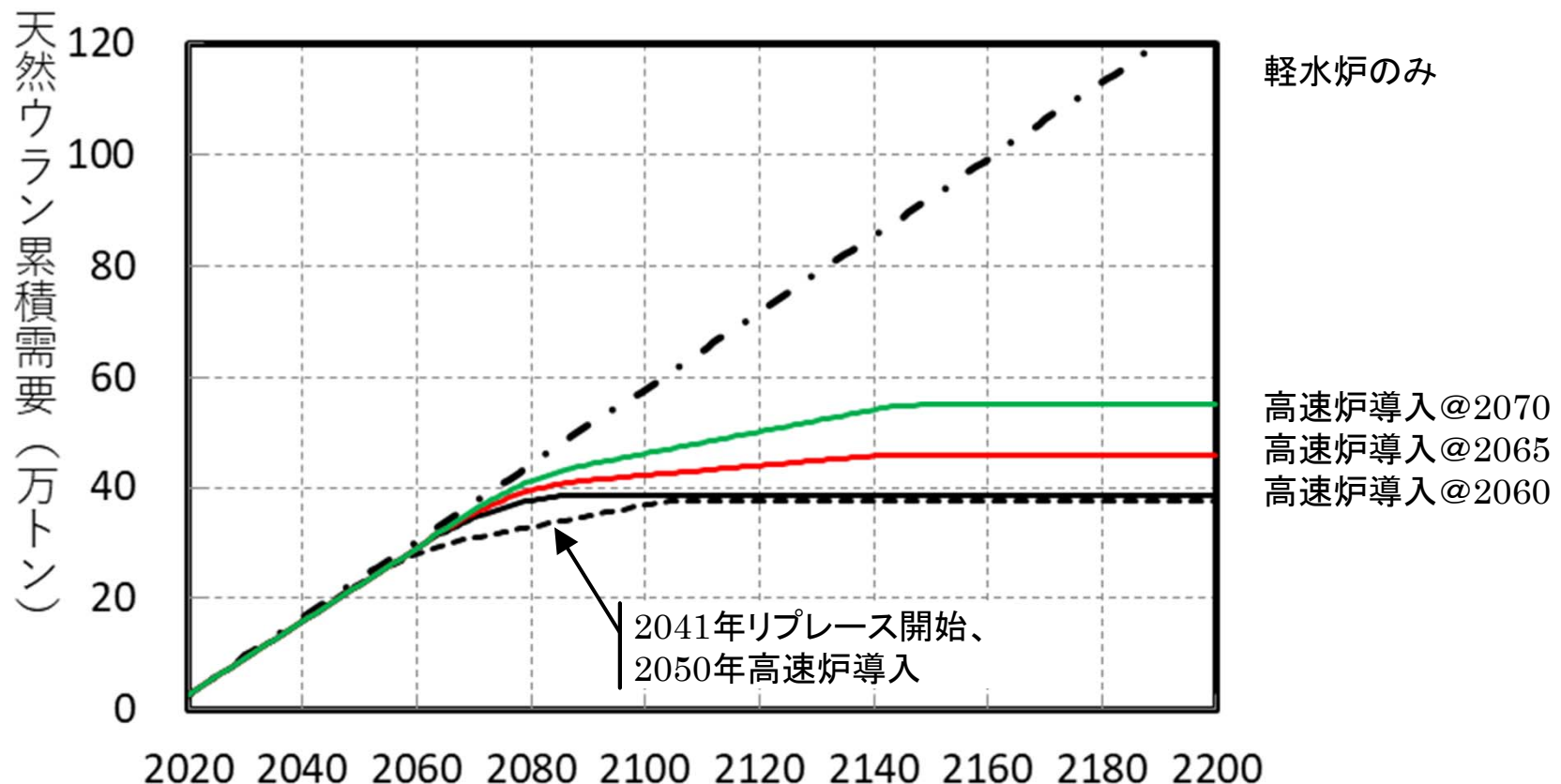
■ 殆どの原子炉を高速炉でリプレイス

- ◇ 今世紀の後半に次々と高速炉を運転開始することとなり、残存する既設軽水炉のウラン燃料手配に於いて強い**価格交渉力**を持てる



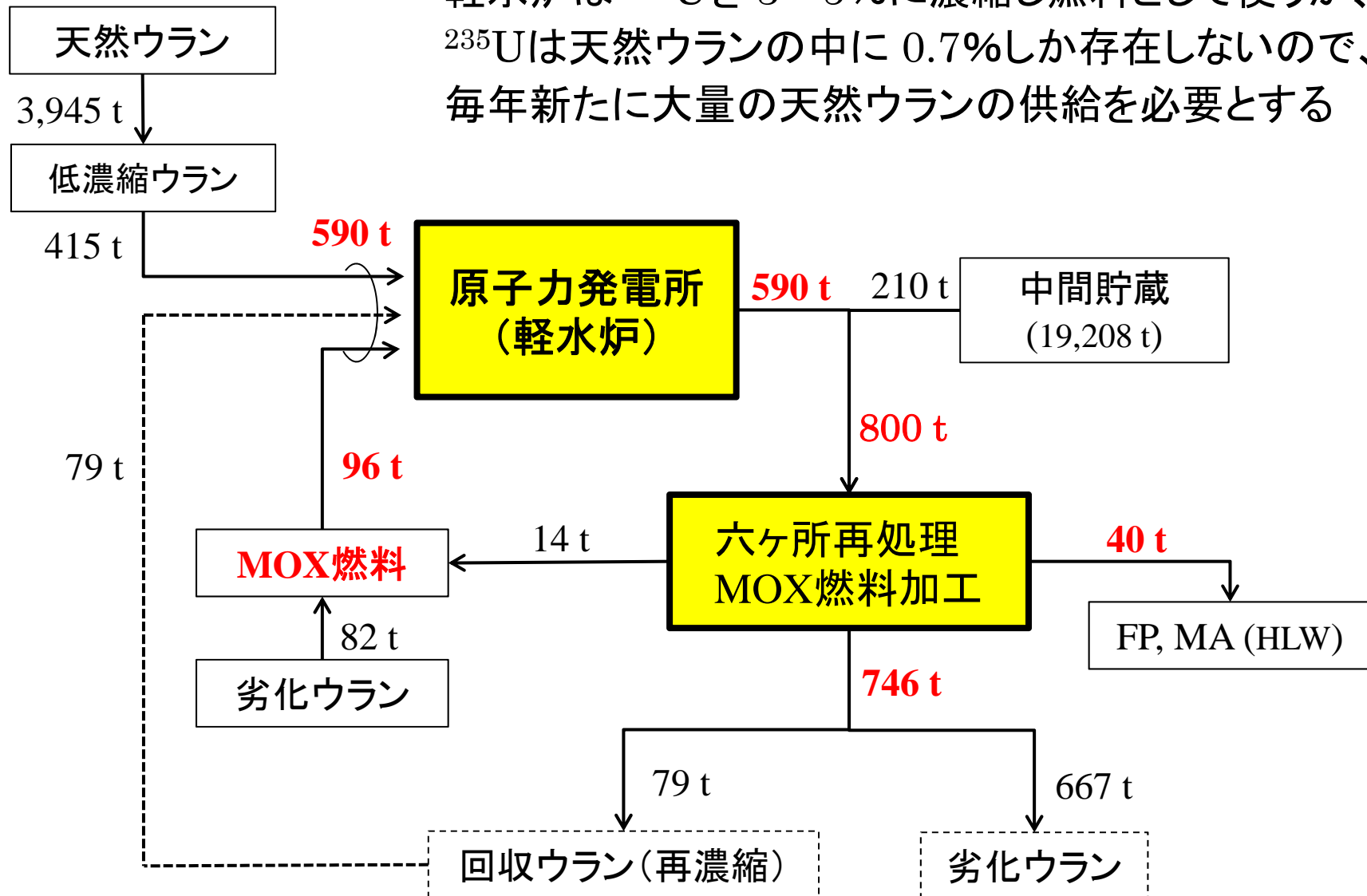
日本の天然ウラン累積需要

- 軽水炉のみでは天然ウラン需要は増え続ける
- 高速炉サイクルへの切替が早いほど天然U需要を抑制
 - ◇ 炉寿命80年で2060年リプレイス開始でも、2060年高速炉導入は効果的
 - ◇ 軽水炉リプレイスを遅らせても、全基を高速炉で替えることが効いた



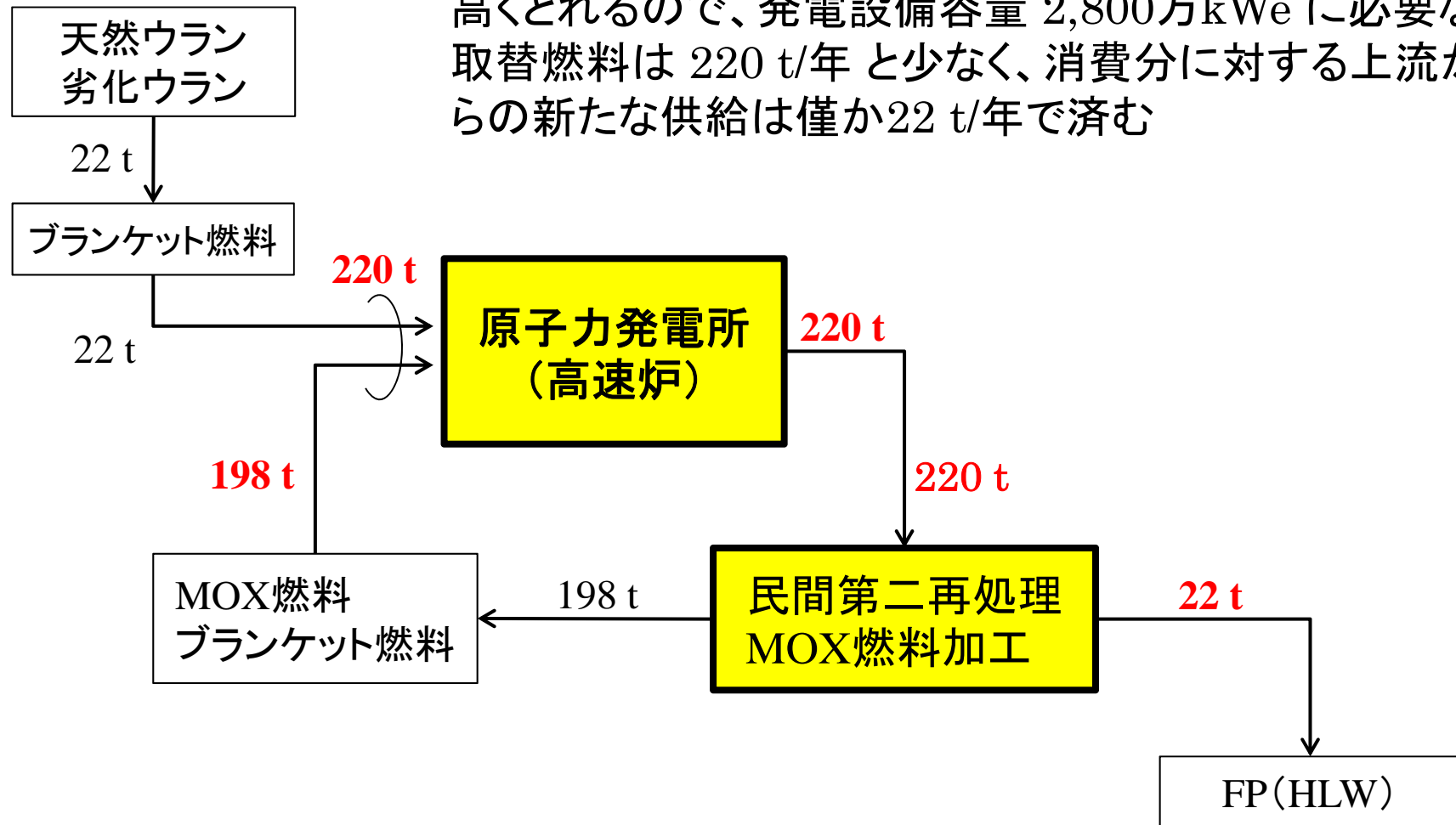
軽水炉燃料サイクルの物質フロー

軽水炉は ^{235}U を 3~5% に濃縮し燃料として使うが、 ^{235}U は天然ウランの中に 0.7% しか存在しないので、毎年新たに大量の天然ウランの供給を必要とする



高速炉燃料サイクルの物質フロー

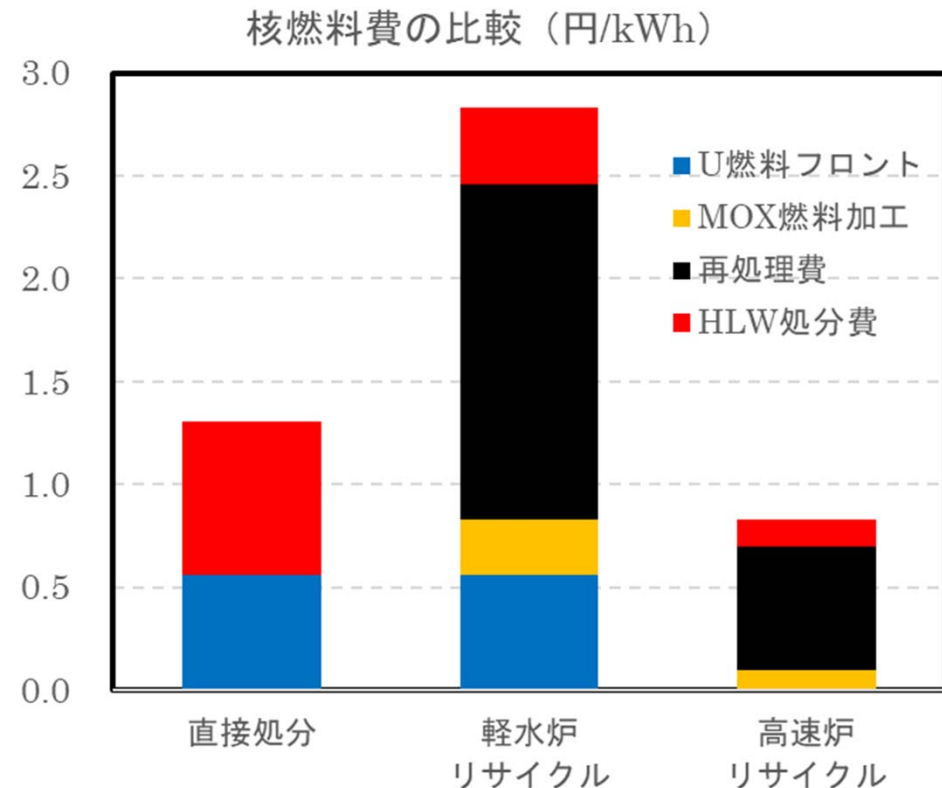
高速炉は熱効率がが高く、取出燃焼度も 100 GWd/t と高くとれるので、発電設備容量 2,800万kWe に必要な取替燃料は 220 t/年 と少なく、消費分に対する上流からの新たな供給は僅か 22 t/年で済む



核燃料サイクル費の比較

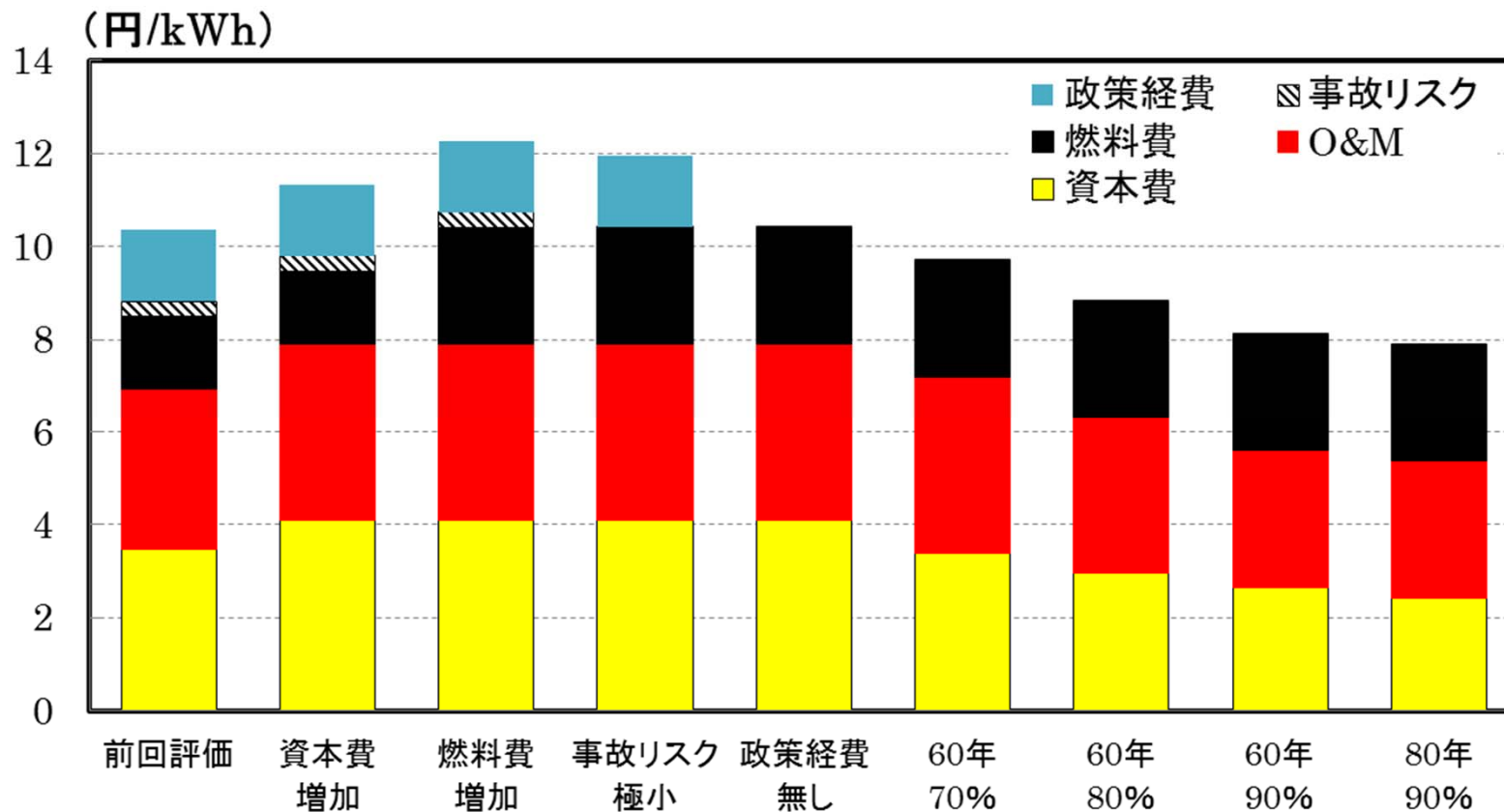
■ 高速炉は軽水炉と比べ核燃料費が安い

- ◇ **熱効率**が高く(34.5 vs. 42.5%)、**取出燃焼度**も高い(45 vs. 100 GWd/t)
- ◇ 1 t の燃料から発電できる電力量が多い
(3億5,810万kWh vs. 9億7,920万kWh)
- ◇ ウラン燃料費用が無い
- ◇ MOX燃料加工単価が低下
- ◇ **バックエンド費用単価が激減**
 - トン当たり電力量の増加
 - 低除染再処理
- ◇ 軽水炉の**直接処分の場合よりも安くなる可能性が大**
- ◇ 軽水炉の燃料費(1回リサイクル)と比べた低下分を、資本費(プラント建設費)の上昇の吸収に使うことができる



原子力コスト削減方策

- 資本費と燃料費が増加したが、原発の安全性は圧倒的に向上
- 事故リスク費用は無視可能となり、政策経費は考慮から外す
- **60年運転、稼働率の向上**、更には80年運転を目指すことが大切
- さらに高速炉の核燃料費は、軽水炉リサイクルから半減



発電原価の比較（軽水炉 vs. 高速炉）

- 高速炉の核燃料費の低さを資本費に回すと、建設単価が**1.4倍**高くても軽水炉と同じ競争力を保つことができる

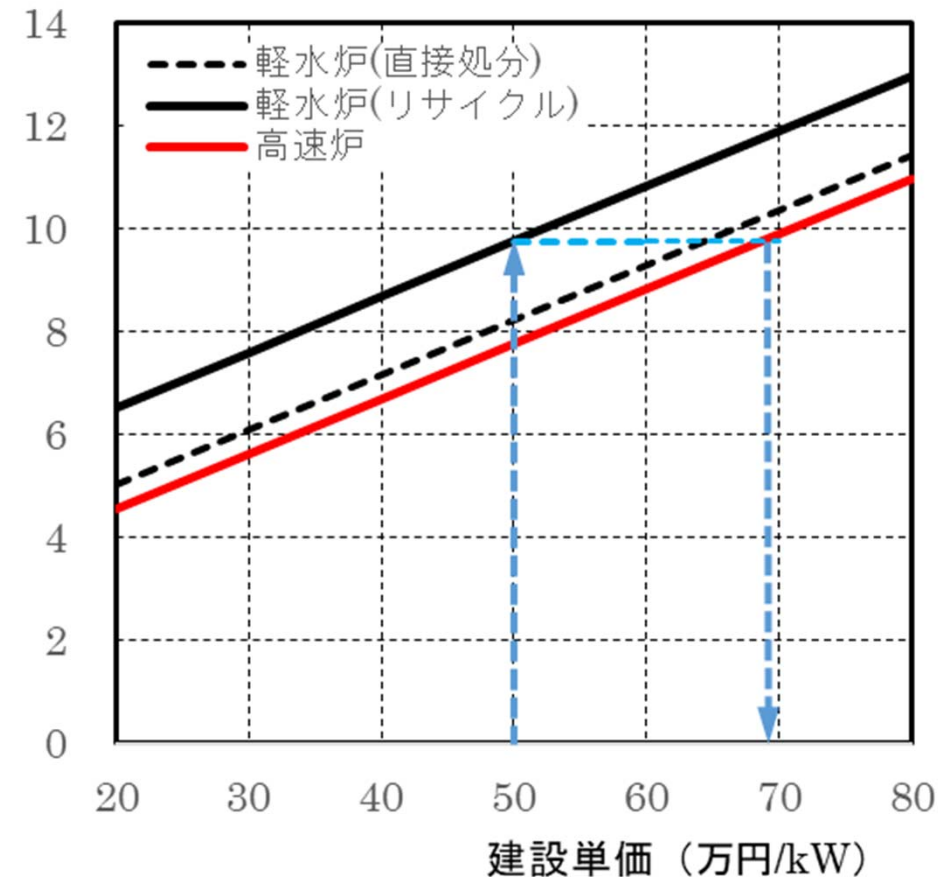
- ◇ 軽水炉を 50万円/kWとすると
高速炉は 69万円/kWでも可
- ◇ 軽水炉の建設単価が低いほど
この倍率は高くなる
- ◇ 近年の軽水炉の核燃料費の上昇が高速炉に優位に働いている

- 他にも高速炉の利点は;

- ◇ 高レベル廃棄物の削減
- ◇ 地層処分場の面積縮小
- ◇ 放射能減衰の早期化

右図の計算条件は;
供用期間40年、利用率80%

発電原価の比較（円/kWh）



日本の高速炉開発

- 高速炉臨界実験装置**FCA**（1967年4月初臨界、2kWt） 廃止予定
- 実験炉**常陽**（1977年初臨界、熱出力 14万kW）
 - ◇ 新規制基準への適合性審査の合格の見通しは得られていない
- 原型炉**もんじゅ**（1994年4月初臨界、電気出力 28万kW）
 - ◇ 様々な不祥事・トラブルと外的影響もあり、本格運転の前に政策的に廃止
- **実証炉・実用炉**
 - ◇ 原子力機構（旧サイクル機構）と電事連・原電が協力して設計研究（→凍結）
 - ◇ 三菱重工を中核メーカーに選定してあるが、国の予算措置は乏しい
- 再処理・MOX燃料加工技術開発
 - ◇ 再処理**RETF**は未完成で放棄され、**プル燃第三開発室**の見通しも厳しい
- 米英独仏が高速炉を閉鎖した後、日本は西側諸国で唯一高速炉を保有していたが、もんじゅ廃止で発電炉の経験を蓄積できず、一方、ロシア・インド・中国が次々と高速炉を運転開始しており、将来必須の技術であるにも拘らず**世界に遅れをとる懸念あり**

他の炉型について

- **U濃縮に依存**する高温ガス炉、軽水炉型のSMRは燃料費に弱点
 - ◇ 今世紀後半は天然U需要が増大し、トレーダ参入で天然U価格が高騰
- 高温ガス炉
 - ◇ 使用済燃料は**再処理困難**(バックエンドのインフラ再構築は非現実的)
 - ◇ 水素生産に貢献する期待はあるが、水素の需給市場で勝ち残れるか疑問
- SMR
 - ◇ 貴重な原子力サイトに土地利用効率の悪い炉型を並べるべきでなく、我が国が**大規模リプレースを必要**とする将来にSMRでの対応は非現実的
 - ◇ 小さな地方電力にとってSMRが魅力的と言うのは誤り
 - 大電力の大型炉建設計画に**共同出資**するのが最も得策(共同立地)
 - 安全審査、地元交渉、建設工事、運転保守を全て大電力が実施してくれる
 - 一部出資で協力した小電力はそれに見合う発電量だけ受電できれば良い
 - **小型炉への投資規模**で、**大型炉のスケールメリット**による安い電気を獲得でき、自前でSMRを建設するより遥かに楽で、経営層はこちらを選ぶ
 - 例えば2F3・4の25%、K1の50%は東北電力、女川3・東通1の50%は東電
- これらの導入を希望する国への協力は、国内メーカ技術維持を図る上で好ましいと考えるが、国内向けに建設するものではない

Pu保有量の問題

六ヶ所再処理はフル操業が必要

- 六ヶ所再処理工場の最大処理能力は 800 tU/年
 - ◇ 800t/年の再処理から**核分裂性Puが 4.4 tPu/年**発生し、これを燃料工場
で軽水炉用MOX燃料に成型加工し(富化度はBWR用5%、PWR用8%)、国
内のプルサーマル対象炉に **77 tHM/年のMOX燃料**を出荷
 - 尚、これまでの試運転(アクティブ試験)で既に 425 t を再処理
- 2030年原子力比率20%から発生する使用済燃料は;
 $(1,065\text{TWh} \times 0.2 \div 24 \div 0.345 \div 0.97) \div 45\text{GWd/t} = 590 \text{ t/年} < 800 \text{ t/年}$
- 国内の原発と六ヶ所工場には使用済燃料を合計 **19,208 t 保管**
 $19,208 + (590 - 77) \times 40\text{年} - 437 = 39,291 \text{ t} > 32,000\text{t} (=800 \times 40\text{年})$
 - ◇ 77 t を引いたのは、六ヶ所では使用済MOX燃料を再処理しないため
 - ◇ **英仏にある日本のPuからMOX燃料**を作ると、炉型を考慮し仏国から161
t、英国から276 t、**合計437 t** となり、それを上の計算で差し引いた
- **六ヶ所工場はフル操業**しても国内の使用済燃料を再処理し切れ
ず、収支均衡状態(590t/年)に下げる余裕は無い
 - ◇ 従って、それに応じて**回収されるPuの利用が大切**

原子力委員会のPu保有量削減方針

我が国におけるプルトニウム利用の基本的な考え方（抜粋）

2018年7月31日 原子力委員会決定

- 我が国は、… **プルトニウム保有量を減少させる**。プルトニウム保有量は、以下の措置の実現に基づき、**現在の水準を超えることはない**。
 1. 再処理等の計画の認可（再処理等拠出金法）に当たっては、… **プルサーマルの着実な実施に必要な量だけ再処理が実施されるよう認可**を行う。その上で、生産されたMOX燃料については、事業者により時宜を失わずに確実に消費されるよう指導し、それを確認する。
 2. … 再処理から照射までのプルトニウム保有量を必要最小限とし、**再処理工場等の適切な運転に必要な水準まで減少させる**ため、事業者に必要な指導を行い、実現に取り組む。
 3. **事業者間の連携・協力**を促すこと等により、**海外保有分の … 着実な削減**に取り組む。
 4. 研究開発に利用されるプルトニウムについては、… 当面の使用方針が明確でない場合には、その利用又は処分等の在り方について全てのオプションを検討する。
 5. **使用済燃料の貯蔵能力の拡大**に向けた取組を着実に実施する。
 - 電気事業者及びJAEAは、プルトニウムの所有者、所有量及び利用目的を記載した利用計画を改めて策定した上で、毎年度公表していく
-
- Pu保有量を減らすとすれば**再処理工場の稼動が制約される恐れあり**

国のPu保有量削減方針に疑問

- 六ヶ所にある今の量は適切な水準とは言えないのか？
 - ◇ MOX燃料工場がフル稼動すれば、全Puで**毎年7トン**を消費
 - ◇ 再処理工場の貯蔵容量(全Puで30トン)に対し、**現在の保管量は僅か 3トン**
- 日本の保有するPuを減らす方法が本当に必要か？
 - ◇ **海外保管のPu**に日本の核武装の懸念は無い筈
 - ◇ 国内保管のPuの平和利用は**IAEAの監視**で担保されている
 - ◇ 六ヶ所再処理を稼動すれば**必ず国内Puは増える**
 - ◇ Puは貴重な**国産エネルギー資源**で、むしろ**備蓄を増やすべきもの**
 - ◇ 六ヶ所再処理の稼動を制約せず、Pu保有量を減らせる方策があるか？
- 政府がもんじゅを廃炉にしたことこそ問題
 - ◇ これこそ、**利用目的を喪失したPu**を出現(JAEAは全Puで 4.6 トンを保有)
 - ◇ JAEAのPuは燃料加工し、もんじゅを運転して帳簿から消すべきだった
 - ◇ 将来の研究開発に用いると言うが、具体的計画は示されていない

分離Pu保有量が増える仕組み

- 再処理で抽出された分離Puが原子炉で消費されるまでの形態
 - ① 再処理抽出量とMOX燃料加工量の差 = **原料在庫**(MOX粉末)
 - ② MOX燃料加工量と製品出荷量の差 = **製品在庫**(MOX燃料集合体)
 - ③ MOX燃料出荷量と炉心装荷量の差 = 発電所に届き、**装荷待ち**の製品

- **①+②+③が分離Pu**

再処理が操業開始すると
我が国の分離Puは増加

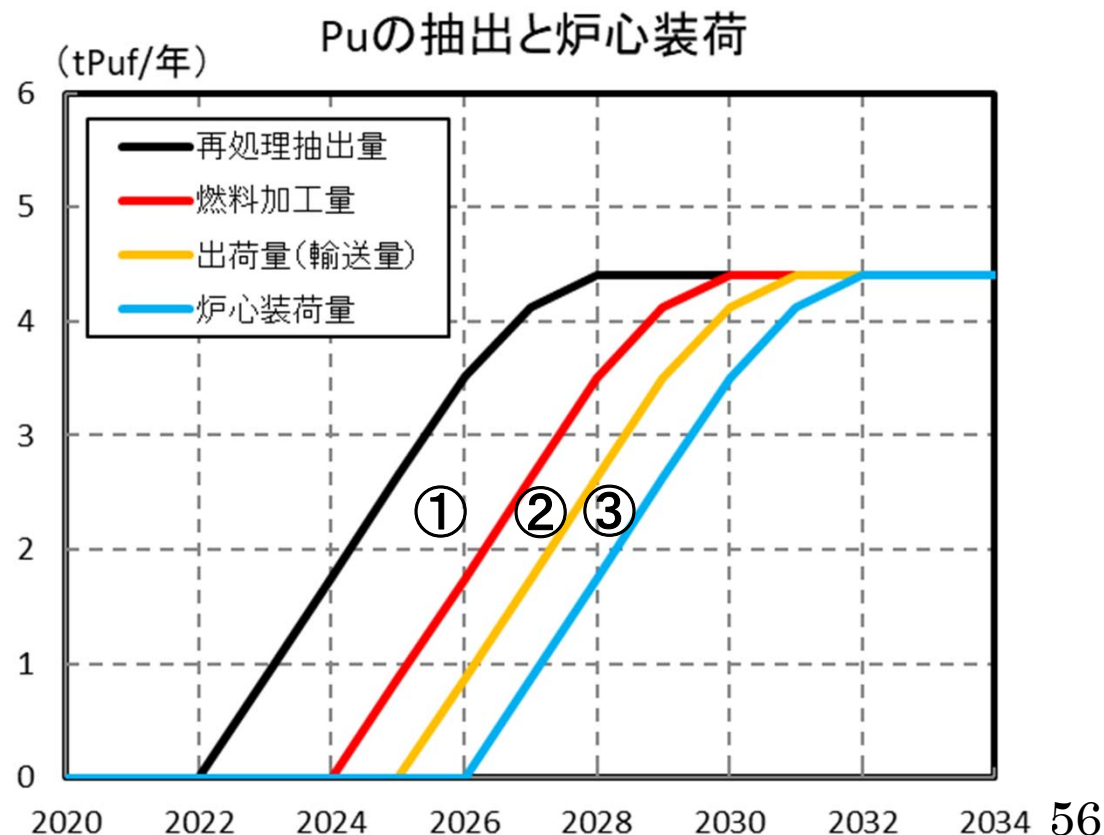
- **再処理抽出量(t/年)
= 炉心装荷量(t/年)**

となって増加は止まる

- 再処理～炉心装荷を
4年とすると;

$6.6 \times 4 = 26.4$ トンの増

仏国にある15.4トンより多い



使用済MOX燃料の扱い

- 軽水炉でPuを利用するためには、除染能力の高い**PUREX法**による使用済燃料の再処理が必要
- 使用済MOX燃料は**中間貯蔵**に回すことが適切
 - ◇ 使用済U燃料と混ぜて再処理する場合、操業レベルが800t/年より下がるならば使用済燃料対策として本末転倒で、拠出金単価もアップ
 - 使用済ウランの発生量に比べ使用済MOXは**1割**と少なく、**中間貯蔵が賢い**
 - ◇ 800 t/年を維持しつつ使用済MOX燃料の再処理が可能とすれば、著しく**分離Pu保有量**を増加し、上限目標を有意に**超過**するので**許されない**
 - ◇ 従って、使用済MOX燃料を再処理して再び軽水炉にリサイクルすることはできない
 - 高速炉では無限リサイクルが可能だが、軽水炉では1回に留めるのが常識
- 高速炉時代の再処理技術
 - ◇ 再処理から抽出されるPuを**分離Pu保有量の帳簿に入れない**ことが重要
 - ◇ 軽水炉の使用済MOX燃料や高速炉のPu燃料を再処理する場合、除染係数を下げ、MA含有燃料として**核不拡散性を強化**

まとめ(プルトニウム保有量)

- 今日稼働しているプルサーマル対象炉の数が少ないから六ヶ所再処理が操業すると**Pu収支が成立しない**というのは誤り
 - ◇ 再処理でのPu抽出から原発での消費までに時間差があるため、収支均衡レベルが現在の保有量より高くなるのは当然だが、増え続ける訳ではない
- エネルギー資源の乏しい日本にとってPuは貴重な**国産資源**であり、利用を平和目的に限定していることが**IAEAの監視**で担保されているからには、その**備蓄を増やしてすら許されるべきもの**
 - ◇ 原油は精製すれば戦車、軍艦、戦闘機、ミサイルの推進燃料となるから、原油の備蓄を減らすべき、と言うか
- 万一のプルサーマル遅延に備え、**減らす工夫を検討**
 - ◇ 再処理の竣工延期は効果が無く、操業レベルの制限も好ましくない
 - ◇ 再処理・燃料加工の両方の操業自由度を確保するために、再処理の製品MOX粉末(燃料加工の原料)の在庫を適切に増やすことも必要
 - ◇ **最大の問題は、日本からの委託で再処理はしたが(=Puを抽出したが)、MOX燃料の加工工場を潰してしまった英国に残されたPu**
 - その国のために六ヶ所工場が制約を受けるのは納得できない

まとめ（日本の原子力）

■ 炉型と核燃料サイクルの長期戦略

- ◇ 既設炉の供用期間は**80年**を目指して環境整備すべき
- ◇ 六ヶ所再処理の**回収U**は、操業年数の概ね半分程度が経過した2040年頃から**再濃縮**して軽水炉用の天然U調達量の削減に貢献させる
- ◇ **2060年**ないし遅くとも**2060年半ばまでの高速炉本格導入**を目指して、炉と核燃料サイクルの技術開発を強力に推進すべき
 - Na炉の温度で水素製造する技術を持てば、電力にとって一石二鳥
- ◇ 軽水炉用の**六ヶ所再処理**は2060年過ぎまで40年間操業するが、その操業終盤には**プルサーマル供給を停止**
- ◇ **U濃縮を必要とする炉型**は 2060年代以降の新規運転開始を**禁止**
- ◇ 高速炉用Pu燃料の母材、またブランケット燃料の材料となる**劣化U**は、**六ヶ所濃縮工場の副産物**として蓄積
- ◇ **使用済MOX燃料**は、2060年代半ば以降に第二再処理工場で扱うものとして40～50年間 **中間貯蔵**し、高速炉導入まで**Pu保有量への計上を回避**
- ◇ **民間第二再処理**は核不拡散性の高いPu燃料を生産できることが重要で、**金属燃料高速炉**と**乾式再処理技術**に本格的に取り組むべきではないか