



日本原子力学会 新型炉部会
部会・連絡会セッション
「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9月6日

○ 森 行秀 (MFBR)

小野 清, 大滝 明 (原子力機構)



目次

1. 背景と目的
2. 世界の原子力の見通し
 - 2.1 原子力成長見通し
 - 2.2 天然ウラン資源の見通し
3. 我が国の原子力の見通し
 - 3.1 国内原子力選択肢の組合せ
 - 3.2 代表的シナリオの特徴
 - 3.3 シナリオの比較
4. 結論



1. 背景と目的

◆ 背景

- 世界は、2015年12月、脱炭素社会を目指すことで合意され、我が国もCO₂を排出しないベースロード電源として原子力エネルギーを利用していく方針。
- 高速炉サイクルは、安全性の確保を大前提に、ウラン資源の利用の大幅な拡大により長期エネルギー安定供給、放射性廃棄物の減容と潜在的有害度の低減が達成できる技術であり、開発意義は不変。
- 最終開発目標に至るには長期の開発が必要であり、開発の間には国際環境の変化、政策の変更など種々の不確定性が存在。

◆ 目的

- 今後50～100年程度の期間におけるエネルギー安全保障、世界情勢、世界貢献など大きな視野に基づき2100年がどのような状況なのかを、原子力発電量、ウラン資源量等から予測設定し、そこに至る道筋をケーススタディする。



2. 世界の原子力の見通し

- 2015年12月、196カ国が参加した気象変動に関するパリ協定において、地球の平均気温上昇を2℃以内に収める目標が合意され、各国政府は、約束草案を提出して対策を取ることとなった。
- 世界のエネルギー・電力・原子力発電予測^[1]における現状（IAEA報告）
 - 30カ国、448基の原子力発電所が稼働
 - 15カ国、61基が建設中
 - 2016年末の原子力発電設備容量、391GWe（過去最高レベル）
- 多くの加盟国は、エネルギー供給の安全保障の向上と気候変動の緩和において、**原子力が低炭素技術として引き続き主導的役割を持つ**と認識^[1]。

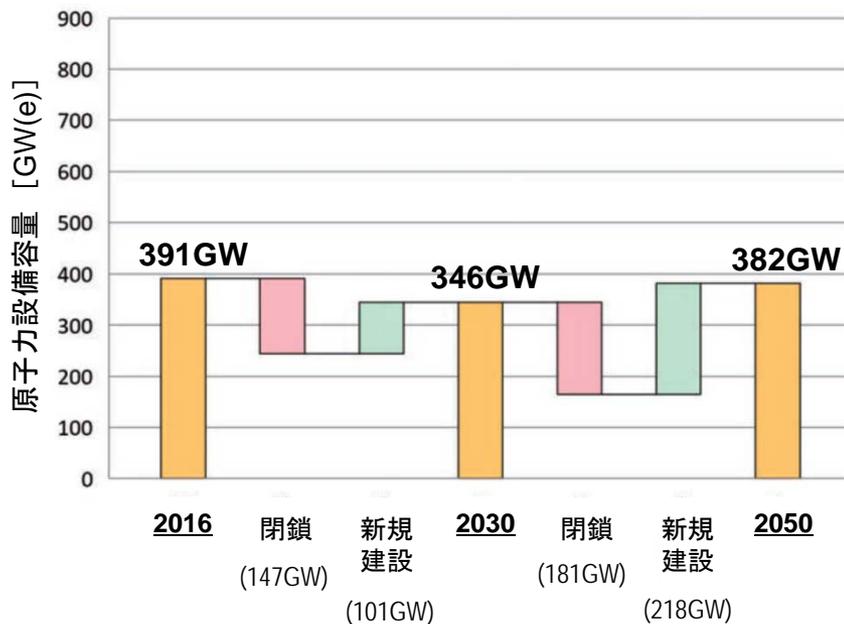
Ref [1] IAEA-RDS-1/37, Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, Sep. 2017



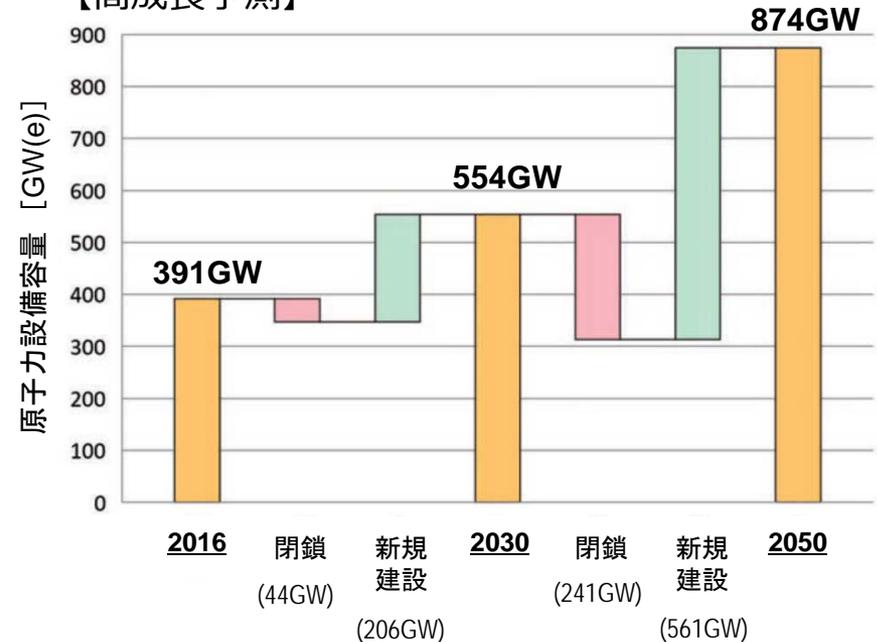
2.1 世界の原子力成長見通し IAEA[1]

- **国際原子力機関(IAEA)**は、将来の原子力成長の見通しについて、低成長予測として2016年の391GWeから2030年には346GWe、2050年には382GWeに回復すると予測する一方、高成長予測では、**現在の経済需要及び電力需要の伸び率が引き続き継続し、特に極東で高い成長が続くと想定し、2030年に554GWe、2050年には874GWeに達すると予測。**

【低成長予測】



【高成長予測】

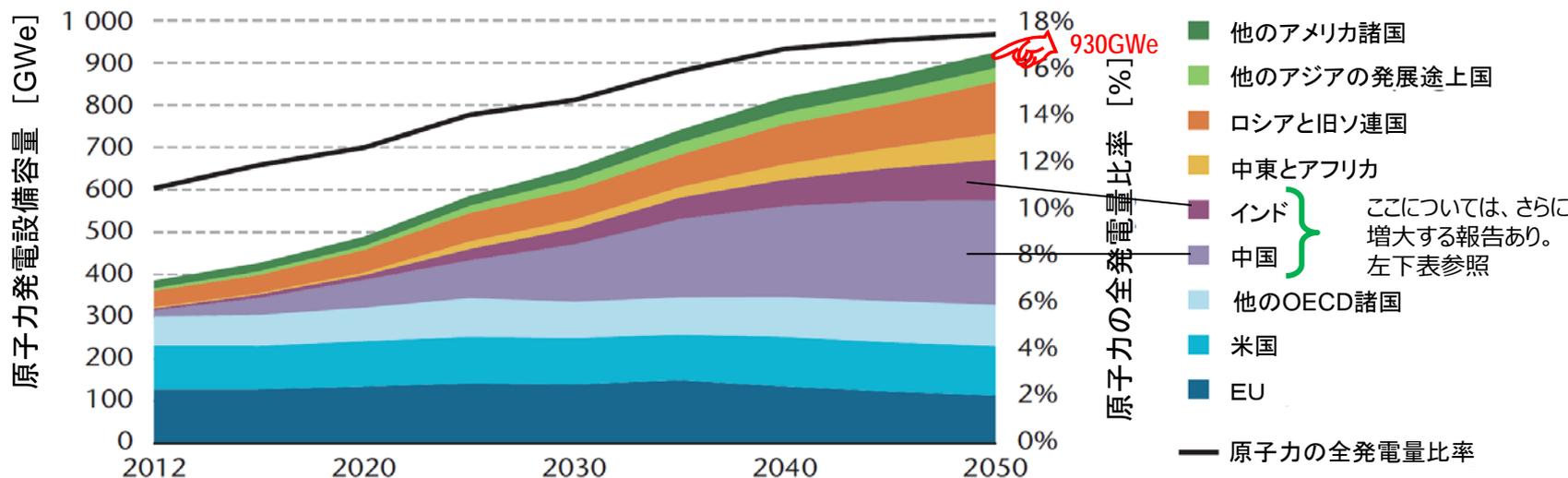


出典 [1] IAEA-RDS-1/37, Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, Sep. 2017



2.1 世界の原子力成長見通し OECD/国際エネルギー機関(IEA)[2]

- **国際エネルギー機関 (IEA)の2°Cシナリオ(2DS)**では、原子力発電設備容量を現状の390GWeから**2050年に930GWeまで増大**させる必要があるとの見通しを提示。
- 一方、**中国、インドの原子力発電規模**は、近年、IEAの予測を上回り、2国で約700GWe規模を目指すとの報告^{[3],[4]}もあり、**2050年の規模は、1,300GWeを超える可能性**もある。



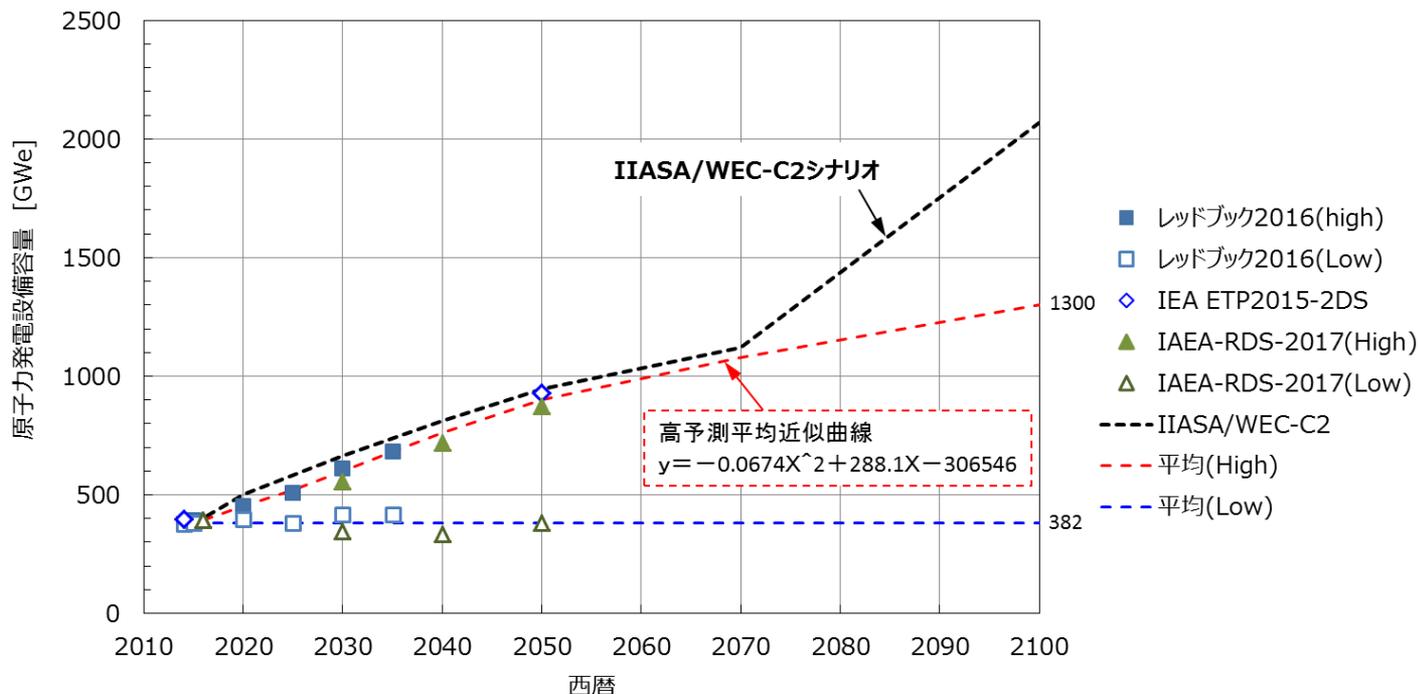
IEA, 2050年見通し		設備容量	最新情報
内訳	インド	90	
	中国	240	>400 ^[3]
	2国合計	330	>675
2050年設備容量		930	>1,300

出典 [2] IEA/NEA, Technology Roadmap : Nuclear Energy, 2015 edition
 [3] 第4回高速炉開発会議・戦略WG資料2”The progress of the GEN-IV Reactor in China”, 2017.9
 [4] 第5回高速炉開発会議・戦略WG資料2「インドの高速炉サイクル開発戦略」,2017.10



2.1 世界の原子力成長見通し 世界の傾向と2100年の予測

- IAEA2017^[1], OECD/NEAレッドブック2016^[5]やIEA2°Cシナリオ^[2]の2050年までの原子力規模拡大予測は、IIASA/WEC-C2*シナリオに漸近する。
- これらの高成長予測(High)の報告値の平均から近似曲線を求め、**2100年断面の原子力発電設備容量を評価すると、1,300GWeに達する。**



IIASA/WEC-C2 : 国際応用システム分析研究所(IIASA)と世界エネルギー会議(WEC)が作成した報告書 (Global Energy Perspectives)の中で、温暖化抑制策として再生可能エネルギーと原子力の普及を想定した環境主導シナリオ (C2)

出典 [5] OECD/NEA No.7301, "Uranium 2016 Resources, Production and Demand",2017



2.2 天然ウラン資源の見通し 資源量の現状

USD260/kgU未満のウラン資源の現状^[5]

在来型ウラン資源			
1506万 t U			
既知資源		未発見資源	
764万 t U		742万 t U	
確認資源	推定資源	予測資源	期待資源
439万 t U	326万 t U	167万 t U	575万 t U

(2015年1月1日現在)

確認資源：鉱床の規模・品位・形状が**明らかな資源**

推定資源：鉱床の規模・特性に関する**データが不十分な資源**

予測資源：既存鉱床の地質的延長にウラン資源の存在が**間接的事実をもとに推定される資源**

期待資源：特定の地質鉱床地帯の中に**期待される資源**

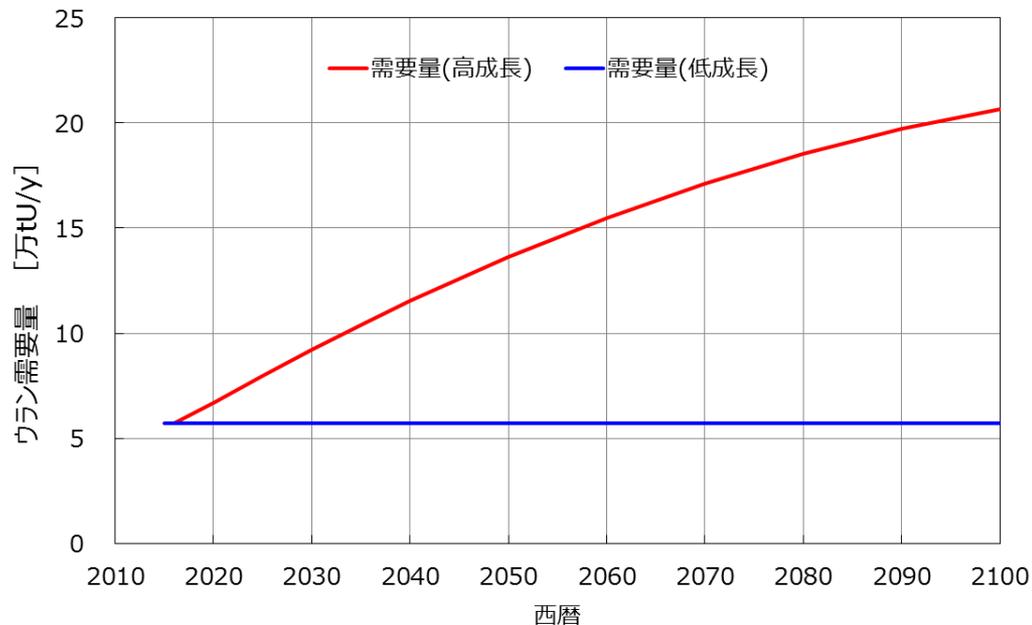
既知資源量764万tUは、パリ協定以前の世界の年間ウラン使用量(約5.6万tU/年)が一定と仮定した場合、**使用期間は約135年に相当**するが、利用が確実な**確認資源量439万tU**として評価すると、**約78年**となる。

出典 [5] OECD/NEA No.7301, “Uranium 2016 Resources, Production and Demand”, 2017



2.2 天然ウラン資源の見通し ウラン需要 2100年の予測

- OECD/NEALレッドブック2016^[5]では、原子力発電設備容量とともに、ウラン需要量も対比して提示されている。
- これらの発電設備容量と需要量の関係と先の発電量の予測近似曲線から、2100年断面のウラン累積使用量を評価すると、高成長予測で1,200万tUを超え、在来型ウラン資源量には到達しないまでも、既知資源量764万tUは超える。また、低成長予測でも、確認資源量439万tUを超える。



2015年～2100年までのウラン累積使用量

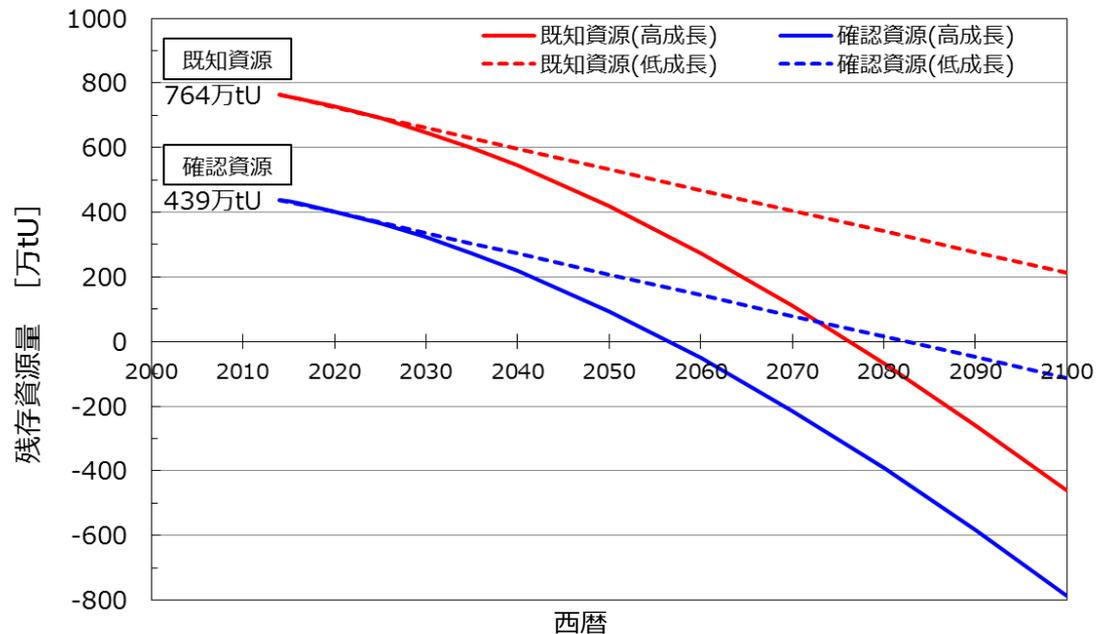
◀ **高成長予測 1,230 万tU**
≥既知資源量 (764万tU)
<在来型資源量 (1506万tU)

◀ **低成長予測 490 万tU**
≥確認資源量 (439万tU)



2.2 天然ウラン資源の見通し 資源量の消費予測

- 既知資源(764万tU)でも、高成長予測の経過をたどると2070年代過ぎには資源量が逼迫。先行して消費される**確認資源(439万tU)**の場合に至っては、**2050年代に入ると逼迫する可能性**があり、**これ以前に、資源価格の高騰や流通制限**(投機の対象としての買占めや価格つり上げなど)がリスクとして顕在化する可能性がある。
- 未発見資源を含む在来型資源(1506万tU)があると予測されていても、その**不確実性は既知資源に比べてさらに高く**、そもそも日本が長期間にわたり海外からウラン資源を輸入し続けなければならない状況は、エネルギーセキュリティ確保の観点から避けるべきであり、21世紀半ばまでには、最悪の状況に対する最善策を考えるべきである。

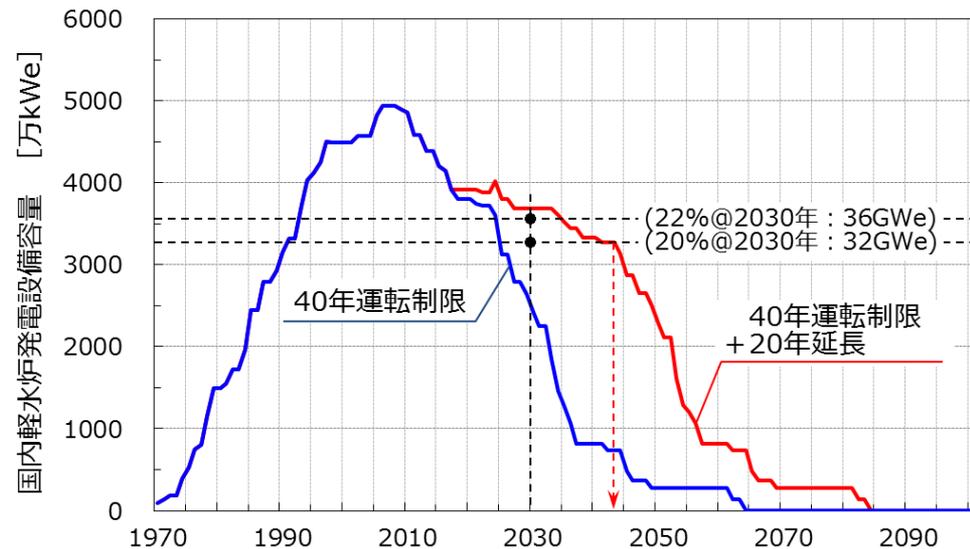




3. 我が国の原子力の見通し

- 2015年7月に策定された「長期エネルギー需給見通し」における2030年断面の原子力比率20～22%(32～36GWe※1)の確保には、全ての既設の発電所を再稼働しても40年運転制限の下では需給見通しの達成は困難であり、60年運転とすることでようやくクリアできる。
- 2040年代半ばには、60年寿命の廃止措置が始まり、150万kW/年のペースで発電設備が不足する事態を迎える。
- 設計から建設まで約20年のリードタイムも考慮し、遅くとも2025年頃には次期導入炉の型式を決める必要がある。

※1:設備利用率75%換算



原子力発電設備容量の見通し



3.1 国内原子力選択肢の組合せ

- 我が国の核燃料サイクル政策は、第5次エネルギー基本計画にも示されるように、資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化・潜在的有害度低減を基本方針として、再処理やプルサーマル計画の推進を指向。
- そこで、原子力発電の長期継続に至る過程を分解。組合せ(シナリオ)を検討。
 - ① 再稼働する原子力発電所をいつまで継続するか（順次停止か、発電の継続）

 - ② そこで発生する使用済燃料は、どう処置するか（直接処分か、再処理か）

 - ③ 使用済燃料から分離回収したPuは、どう処置するか
（プルサーマル発電で使用（短期・長期））

 - ④ その使用済燃料（プルサーマル）は、どう処置するか（直接処分か、再処理か）

 - ⑤ 使用済プルサーマル燃料から分離回収したPuは、どう処置するか
（多重リサイクルか、高速炉か）

 - ⑥ その使用済燃料は、どう処置するか（第二再処理で適宜再処理、さらに将来）



3.1 国内原子力選択肢の組合せ

シナリオ		軽水炉				高速炉 (FR)		
		発電(UOX)	使用済UOX燃料	発電 (MOX)	使用済MOX燃料	発電 (MOX)	使用済FR燃料	
原子力 早期撤退	A1	2030年までに 全プラント停止	中間貯蔵 →直接処分	既保有Pu分のみ 発電	発生分は直接処分	-	-	
原子力 順次停止	B1	再稼働し、所定の年 数稼働後、停止 新增設なし	中間貯蔵 →直接処分	既保有Pu分のみ 発電	中間貯蔵 →直接処分	-	-	
	B2		RRPで再処理 以降は直接処分	現計画のみ (大間NPPまで)		-	-	
長期エネルギー 需給見通しに 基づき 2030年発電 割合を維持 高速炉導入 なし	C1	発電量維持のため UOX新增設導入	中間貯蔵 →直接処分	既保有Pu分のみ 発電		中間貯蔵 →直接処分	-	-
	D1		RRPで再処理 以降は直接処分	現計画のみ (大間NPPまで)			-	-
	E1		Puバランス範囲内で プルスーマル発電 長期継続	全量再処理 第2再処理～	-		-	
	E2				-	-		
長期エネルギー 需給見通しに 基づき 2030年発電 割合を維持 高速炉導入 あり	F1	高速炉完全移行 までは新增設	全量再処理 六ヶ所再処理～	現計画のみ (大間NPPまで)	全量再処理 第3再処理～	2050年頃より導入 導入量：最大プ ルスーマル規模まで	全量再処理 第2再処理～	
	F2						全量再処理 第3再処理～	全量再処理 第3再処理～
	G1		全量再処理 第2再処理～	全量再処理 第3再処理～	2050年頃より導入 2100年以降、全発 電量規模まで移行	全量再処理 第2再処理～	全量再処理 第2再処理～	
	G2					全量再処理 第3再処理～	全量再処理 第3再処理～	
	G3					同上 MA分離(99%)	同上 MA5wt%含有	同上 MA分離(99%)

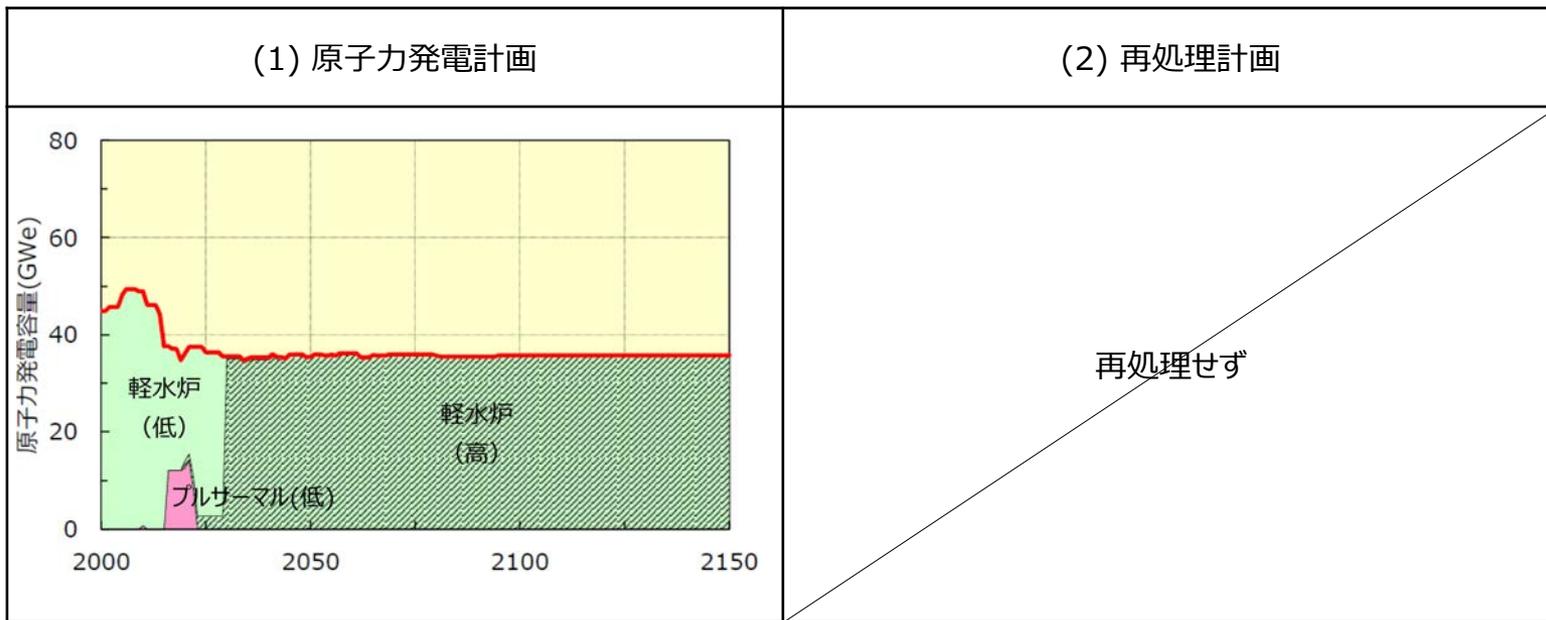


3.2 代表的シナリオの特徴

(1) ワンスルー(計画)

〈シナリオ〉

- 原子力(軽水炉)による発電を2030年以降も継続。
- 目的のないPu(余剰Pu)を保有しないため、現在の六ヶ所再処理工場は稼働しない。
- 現在、海外(英・仏)、国内で現在保有するPuの分のみ、プルサーマルで発電(約10年)。
- 発生する使用済燃料は、直接処分。



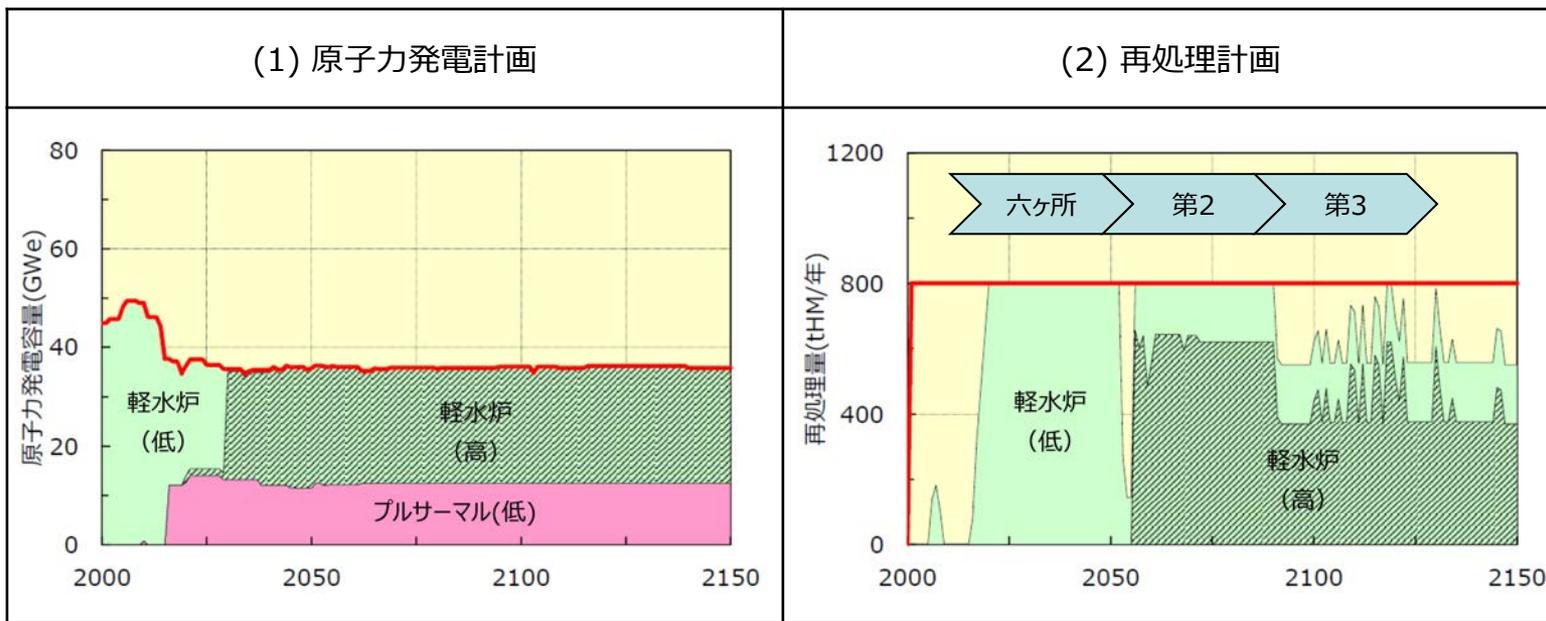


3.2 代表的シナリオの特徴

(2) プルサーマルの長期継続(計画)

〈シナリオ〉

- 原子力(軽水炉)による発電を2030年以降も継続。
- 六ヶ所再処理工場さらには、第2再処理工場以降も稼働。(寿命40年)
- 使用済ウラン燃料から分離されるPuは、プルサーマル発電でPuバランスが取れる範囲で消費。(約12GWe : 全発電量の約1/3)
- 使用済プルサーマル燃料は、再処理を行わず、直接処分。



使用済ウラン燃料のみ再処理



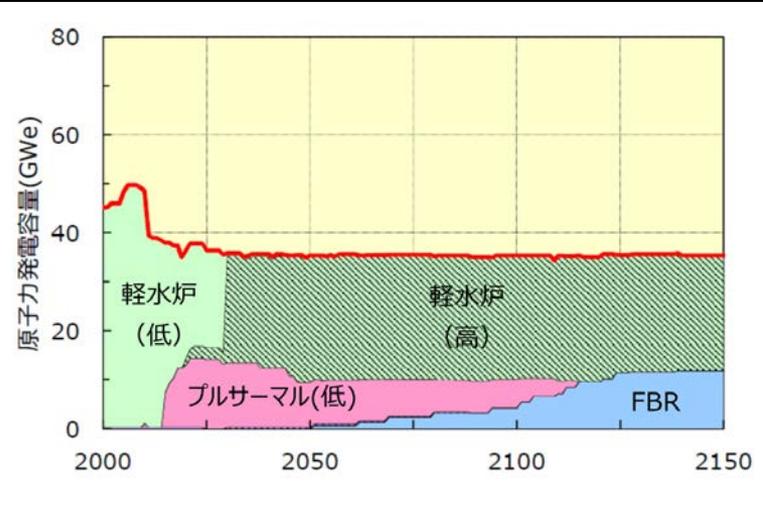
3.2 代表的シナリオの特徴

評価例：高速炉少数基導入(計画)

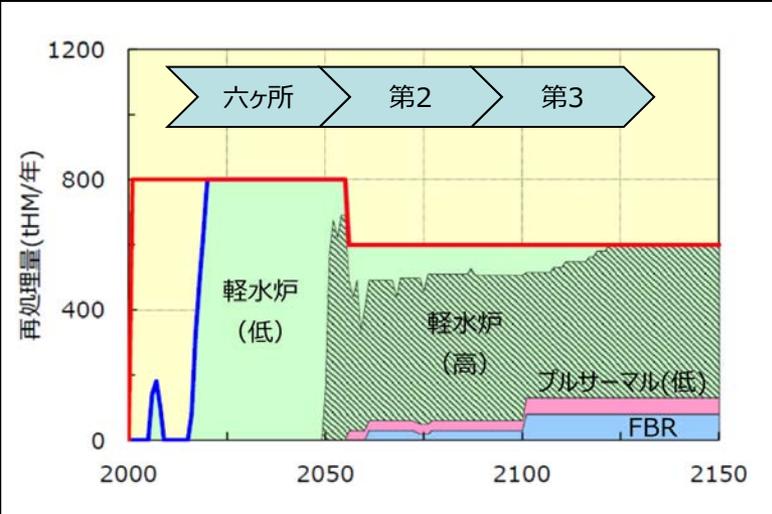
〈シナリオ〉

- 原子力(軽水炉)による発電を2030年以降も継続する。
- 六ヶ所再処理工場、第2再処理工場以降も計画通り稼働。
- 使用済ウラン燃料から分離されるPuは、プルサーマル発電でPuバランスが取れる範囲で消費。
(約12GWe：全発電量の約1/3)
- 使用済プルサーマル燃料も、第2再処理工場から再処理を開始し、2050年過ぎから導入される高速炉(FBR)燃料に使用。
- 高速炉(FBR)の導入規模は、プルサーマル発電規模まで約50～60年かけて導入。使用済FBR燃料も第2再処理工場から再処理。使用済プルサーマル燃料との混合処理を始め、高次化したPuのリフレッシュを図る。

(1) 原子力発電計画



(2) 再処理計画



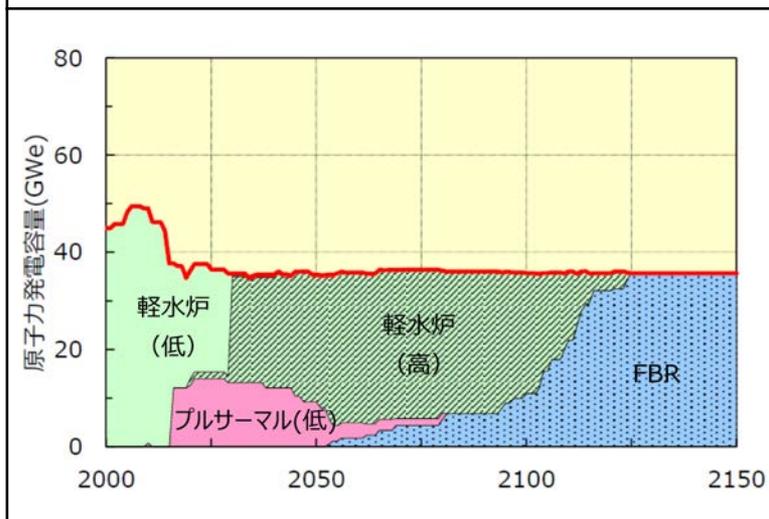
3.2 代表的シナリオの特徴

高速炉本格移行(計画)

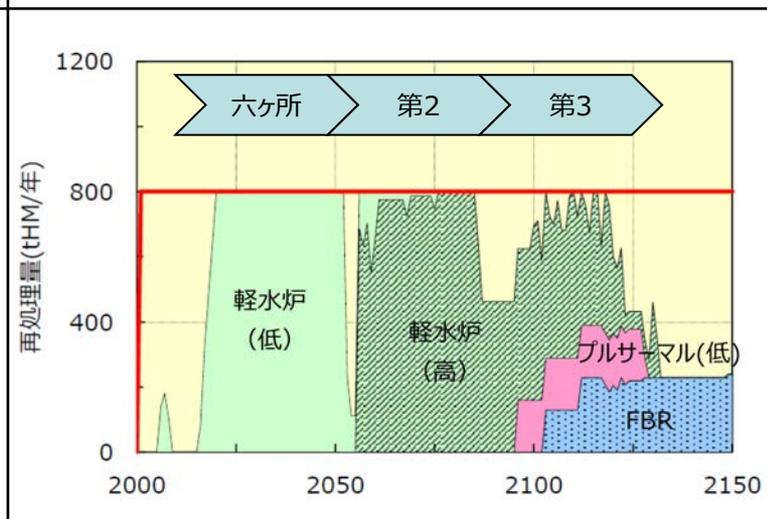
〈シナリオ〉

- 原子力(軽水炉)による発電を2030年以降も継続。
- 六ヶ所再処理工場、第2再処理工場以降も計画通り稼働。
- 使用済ウラン燃料から分離されるPuは、プルサーマル発電で消費するとともに、**高速炉(FBR)燃料に使用。**
- **高速炉(FBR)は2050～2100年にかけて緩やかに導入し、MOX燃料再処理技術が確立する2100年以降から本格導入し、軽水炉からFBRへ完全移行。**
- **使用済MOX燃料(プルサーマル、高速炉)は、第3再処理工場から再処理。**

(1) 原子力発電計画



(2) 再処理計画





3.2 代表的シナリオの特徴 シナリオの評価指標

指標項目			シナリオ評価指標の判断条件
短期的重要課題	使用済燃料貯蔵量の逼迫	使用済燃料中間貯蔵量	使用済燃料の貯蔵量は、現在計画する中間貯蔵対策量（約3万トン）を超えないこと
	核燃料サイクルを巡る国際的視点	回収Pu貯蔵量	利用目的のないPu（余剰Pu）を保持しないため、回収したPuの貯蔵量は50tPu以下に留める
		炉外Puインベントリ	核燃料サイクルの系内、特に炉外に存在するPuインベントリが将来にわたり過剰に増加しない
中長期的重要課題	資源有効利用	天然ウラン累積使用量	2150年時点の天然ウランの累積使用量が、軽水炉発電継続時の累積使用量（約80万tU）に比べ、どの程度の節約効果があるか
	環境負荷低減	処分面積	高レベル放射性廃棄物の処分面積が現状（ガラス固化体処分面積：6～10km ² ）※1と比べ極端に増加しないこと
		潜在的有害度	処分後の潜在的有害度（天然ウランレベル相当になる年数）がどの程度低減できるか

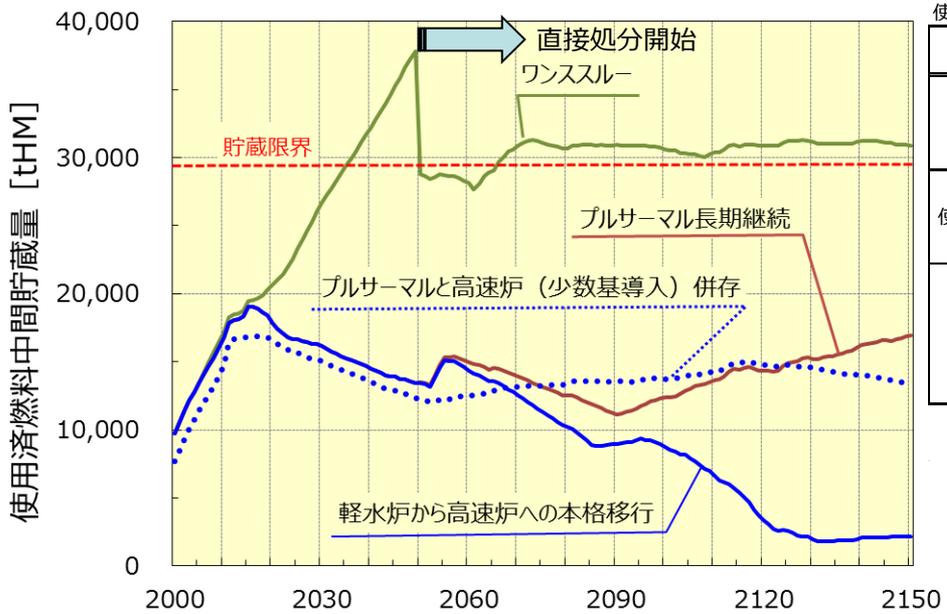
※1：出典：原子力発電環境整備機構(NUMO)ホームページ



3.3 シナリオの比較

(1) 使用済燃料貯蔵量の逼迫

- **直接処分 (ワンスルー)**を選択肢とした場合、使用済燃料の貯蔵量(冷却中)は**2030年過ぎに貯蔵限界量(約3万トン)を超える**ため、約1万トン程度の追加の中間貯蔵施設が必要となる。(2050年より直接処分開始)
- 一方、六ヶ所再処理工場や以降の核燃料サイクルを選択する場合、**プルサーマル長期継続**で使用済プルサーマル燃料を貯蔵し続けたとしても、**中間貯蔵量は1.5万トン程度であるが、緩やかに漸増**する。
- 2050～2120年にかけて**プルサーマルと高速炉(少数基導入)**で**長期併存**する場合は、**2150年時点では1.3万トンになり、緩やかではあるが、その後は緩やかに減少**する。
- 2090年頃から**高速炉の本格移行する場合**は、2130年頃には使用済軽水炉燃料及び使用済プルサーマル燃料の再処理が終了し、使用済高速炉燃料が**3千トン程度まで減少し、以降、平衡状態**となる。



使用済燃料貯蔵計画

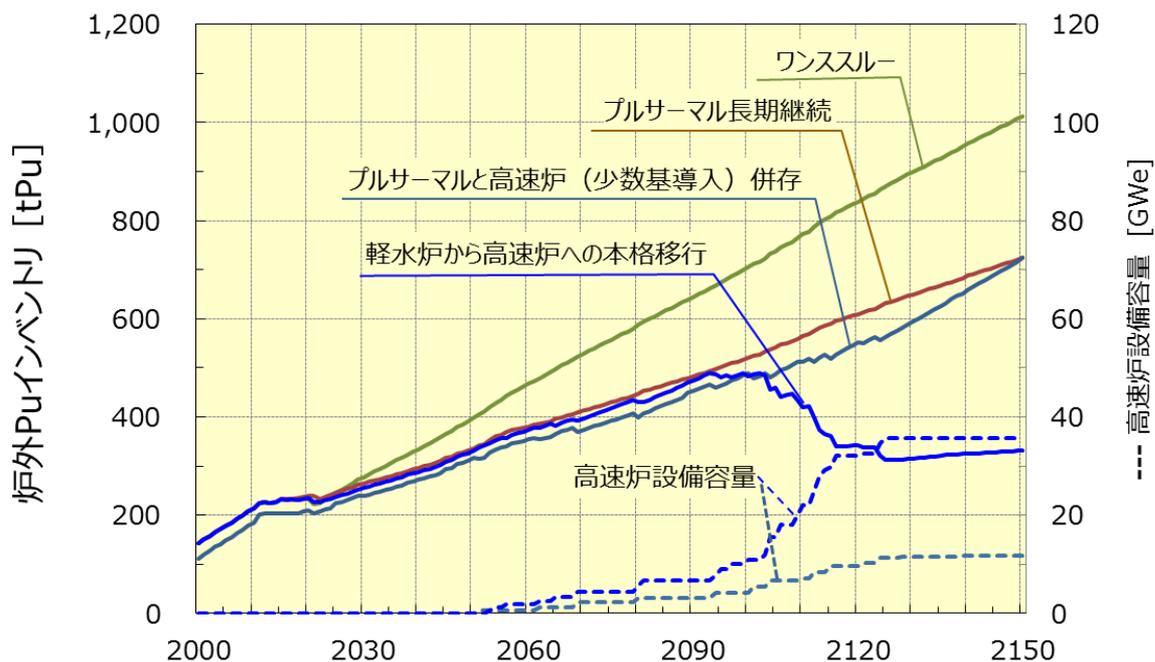
項目	容量	備考	
使用済燃料貯蔵量	① 原子力発電所内	合計：17,694 tU 2015年11月末時点	
	② 六ヶ所再処理工場内		2,964 tU
使用済燃料貯蔵能力	① 原子力発電所内	管理容量として。貯蔵容量は、21,630 tU	
	② 六ヶ所再処理工場内		3,000 tU
貯蔵能力増強対策	③ リラッキング、乾式貯蔵等	中部電力:400tU、九州電力:480tU 東海第二:70tU	
	④ リサイクル燃料備蓄センター		3,000 tU
	⑤ 関西電力中間貯蔵計画		2,000 tU
		29,630 tU	福井県外で2030年頃操業開始

出典：使用済燃料対策推進計画、電気事業連合会(2015年11月20日)

3.3 シナリオの比較

(2)核燃料サイクルを巡る国際的視点

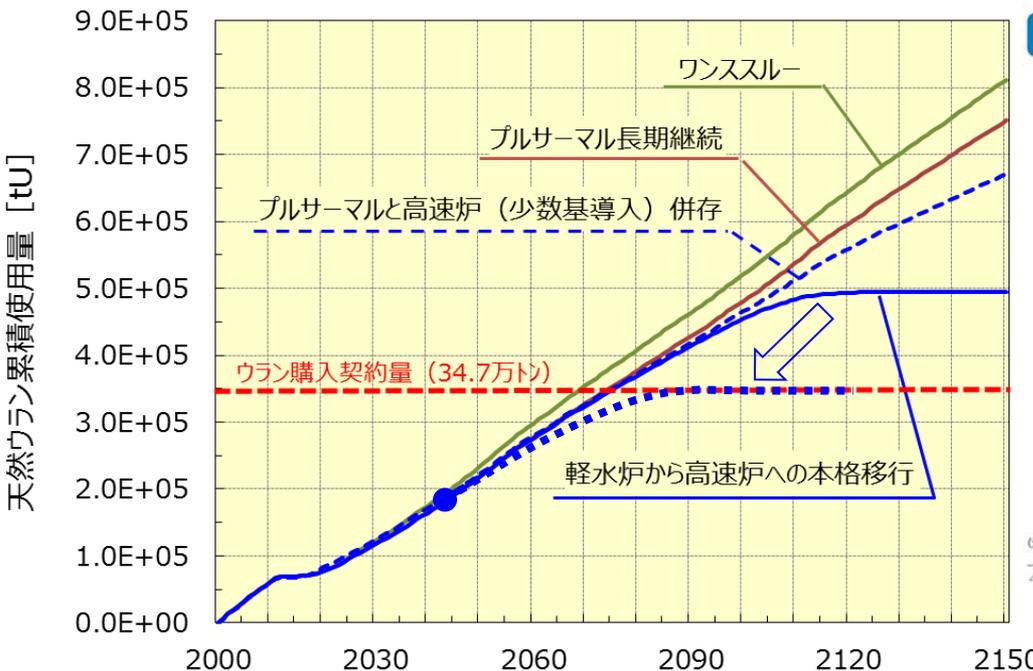
- 炉外Puインベントリ※は、**ほとんどが使用済燃料として炉外に貯蔵**されているため、**中間貯蔵量と同じ傾向**を示す。ワンスルーの場合、2150年には約1,000トンを超えるが、**高速炉の本格導入**を行い完全移行する場合、高速炉の**本格導入と同時(2090年頃)から炉外Puインベントリが減少**し、完全移行に達する2120年以降は、**約300トン程度で推移**。
※：製品Pu, 再処理段階でガラス固化体へ移行したPu, 使用済燃料集合体中のPuの合計
- 回収Pu(製品Pu)の蓄積量は、再処理によって調整が可能であり、利用目的のないPuが過剰に蓄積されることはない。(核分裂性Puの貯蔵量は、一時的に30tPu-fを超えるが、平均して20tPu-f程度で推移する。)



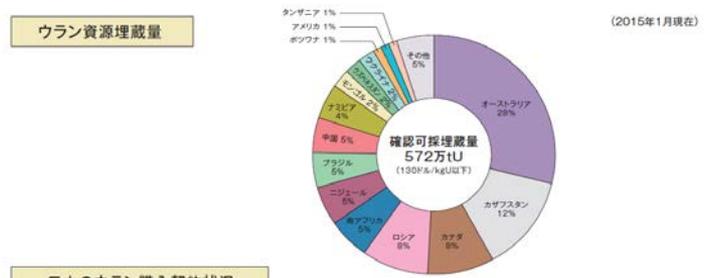


3.3 シナリオの比較 (3)資源有効利用

- ウラン燃料を利用する軽水炉体系をワンスルーで長期継続する場合、天然ウランの使用量は単調増加し、2070年には我が国のウラン購入契約量35万トンを超え、**2150年には80万トンを超える。**
- プルサーマルの長期継続を選択した場合、ウラン資源の節約は**2150年時点で約6万トン(8%)の節約**に相当。
- 高速炉との長期併存～移行を行う場合、2150年時点の**ウラン資源節約量は、約13万トン(19%)**に相当。
- 2090年頃から高速炉の本格導入～完全移行した場合、30年経過時点(2120年)で**約30万トン(38%)の節約**となる。(導入が早ければ早いほど、節約効果は顕著になる。)



ウラン資源埋蔵量と確保状況



日本のウラン購入契約状況

(2014年3月現在)

輸入契約形態	相手先国	契約数量 (U ₃ O ₈ ショートトン)
長期契約、短期契約および製品購入	カナダ、イギリス、南アフリカ、オーストラリア、フランス、アメリカ等	約367,900
開発輸入分	ニジュール、カナダ、カザフスタン等	約83,100
合計		約451,000

(注)四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある。tUは金属ウランでの重量トン
1ショートトン=約0.907tU

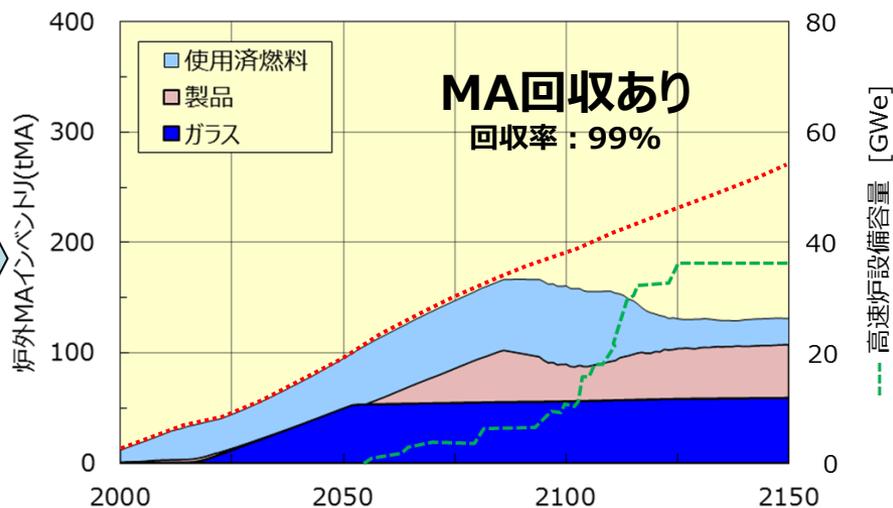
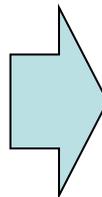
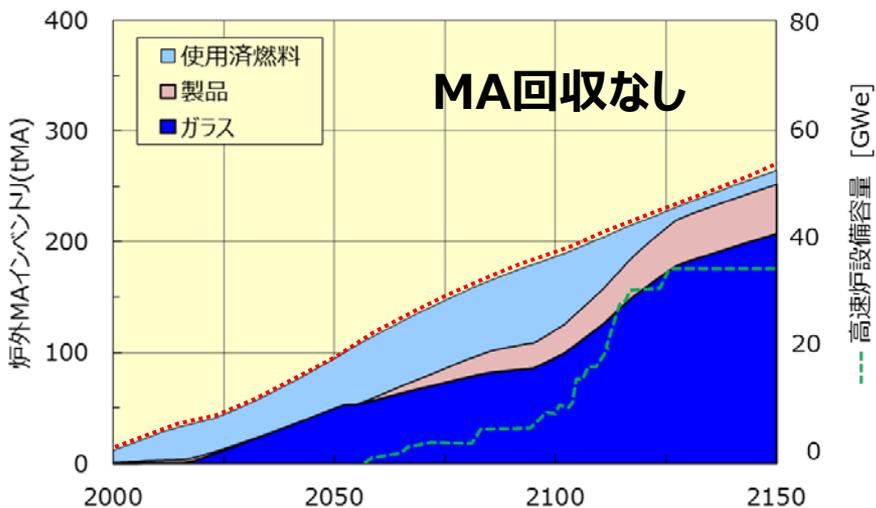
4-1-2 $1\text{tU} = 0.769 \text{ stU}_3\text{O}_8$
 $\text{確保量} = 451,000 \text{ stU}_3\text{O}_8 \times 0.769 = 347,000\text{tU}$

出典: OECD-IAEA「Uranium 2016」、電気事業連合会「原子力・エネルギー図面集2016」より作成

3.3 シナリオの比較

(4)環境負荷低減 (MAリサイクル)

- 高速炉の本格導入・移行サイクルにおいて、MA(マイナーアクチノイド)を分離・回収しない場合、2150年時点で炉外に存在するMA存在量は約260tMAとなるが、MAを99%の収率で分離・回収し、5wt%の割合で高速炉燃料に含有させ燃焼させると、その**存在量は約130tMAと1/2に減少**する。
- この場合、2090年～2150年までの**60年間のMA累積消費量は、約4,000tMA**となる。

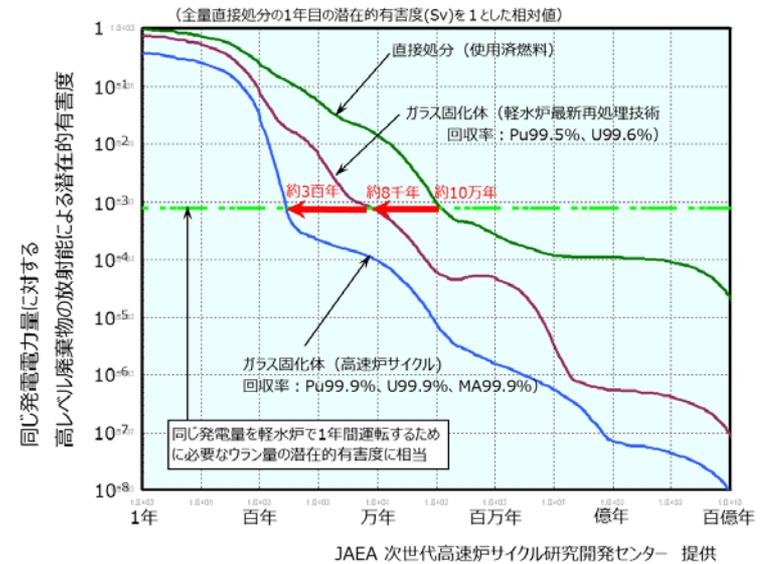
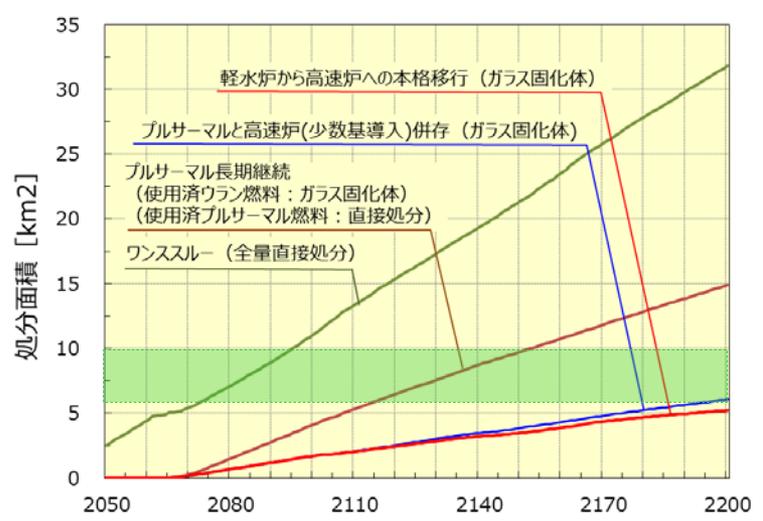




3.3 シナリオの比較

(4)環境負荷低減 (廃棄物量・有害度)

- 高レベル放射性廃棄物（廃棄体）の処分面積は、再処理を経て**ガラス固化体として処分する場合、約5～7km²**(羽田空港の約1/2)※となるが、燃料集合体として**直接処分する場合**は、処分体間の離間距離を多く取る必要が生じることから、ガラス固化体の場合に比べて**約5倍の広さ (32km²)**：山手線内側の面積の約1/2)が必要となる。 ※：現在、地層処分として想定する処分体4万本の処分面積は、6～10km²を想定 (NUMOホームページ)
- 処分体の放射能毒性は、直接処分の場合、埋設後に天然ウランレベルに低下するまで約10万年以上を必要とするが、軽水炉サイクルにおいて、ガラス固化体として埋設する場合は、約0.8～1万年まで期間が短縮し、さらに高速炉サイクルにおいてMA(マイナーアクチニド)を99.9%の収率で回収して**高速炉サイクルの中に閉じ込めることにより、約3百年までの短縮が可能**となる。





4. 結論

- 気象変動に関するパリ協定合意や自国のエネルギー安全保障により、世界の原子力発電規模は増加傾向に向かい、現在の規模390GWeは、2050年には400GWe(低)～900GWe(高)へと拡大し、2100年では、400GWe(低)～1,300GWe(高)まで伸長する可能性がある。これに対して、2015～2100年に原子力発電施設から要求されるウランの需要は、低成長予測で約490万tU、高成長予測で約1,230万tUと評価される。
- 中国、インドなどの原子力利用の大幅拡大や、確認資源以外のウラン資源の利用可能性などの不確実性を考慮すると、供給源のウラン資源は、**21世紀半ば**には確認資源を消費し尽くし、推定資源に頼ることとなり、**ウラン資源の流通制限や価格高騰を招くことが懸念**される。
- エネルギー自給率の低い日本として、このような状況に対応するには、**21世紀半ばまでには、ウラン資源への依存度を下げることができる高速炉技術の実用化見通しを獲得しておくべき**である。



4. 結論

- 高速炉サイクルは、天然ウランの需要を抑え、我が国をウラン資源の価格高騰や流通の制約から解放し得る。(資源の有効利用)
- 軽水炉発電が長期間にわたって利用される場合でも、少数基の高速炉導入により、軽水炉利用の持続性を高めることができる。(資源の有効利用)
- 高速炉サイクルは、高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の発生量の減容やこれに伴う処分場面積の削減、潜在的有害度を低減する効果が期待できる。(環境負荷の低減)
- 高速炉開発は、一朝一夕に成し得るものではなく、特に発熱量や中性子強度の高いマイナアクチニド (MA)を安全に取扱う技術開発には時間を要する。したがって、まずは21世紀半ば頃より、U/Puの資源有効利用を可能にしてウラン資源を節約し、次にMAのリサイクルを目指す段階的なシステムの技術拡張を図るべきである。