

# 米国における核燃料サイクルの 経済性評価の例

(ホストン・コンサルティング・グループのレポートの概要)

平成19年1月30日

小野 清

次世代部門 サイクル解析Gr.

# 1 報告書\*<sup>1</sup>の背景(1/2)

※1 本資料は、ボストン・コンサルティング・グループの下記報告書の概要をとりまとめたものである。  
“Economic Assessment of Used Nuclear Fuel Management in the United States” (July 2006)

## 米国の戦略

ネバダのユッカ・マウンテンを処分場としたワンスルー戦略

## ワンスルー戦略の利点

- 現在、原子炉サイトに保管されている5.4万トン(2005年の推算)全ての使用済燃料(SF)を処分する能力がある
- 処分容量が追加された場合、冷却、中間貯蔵後に排出される追加の使用済燃料全てを処分する能力がある
- 処分後の使用済燃料については、それ以上処理をする必要がない

## DOE 2001年の解析

DOEは2001年に、8.38万トンの商業使用済燃料を全量処分するユッカ・マウンテン処分場に、約460億ドル(2005年\$)の投資が必要と推算(原子炉サイトでの中間貯蔵コストは含まず)。※2

※2 “Analysis of the Total Life Cycle Cost of the Civilian Radioactive Waste Management Program—2001,”

# 1. 報告書の背景(2/2)

## ワンスルー戦略のみを推進することへの疑問点

- 当初の試算からかなりコストが増加している
- ユッカ・マウンテンの容量が12万トンに拡張できると想定しても、近年の使用済燃料発生率では、2035年以降に排出される燃料のために追加の処分場容量が必要(図)
- 2005年エネルギー政策法令に基づくと、米国の将来の原子力発電量は、現在導入されている103GWを超え少なくとも112GWとなり、特に炭素減少法が制定された場合、潜在的に160GWとなる
  - 再処理は処分場節約のための代替技術として有効
  - 再処理戦略は長期の再処理産業実績による高いレベルの信頼がある

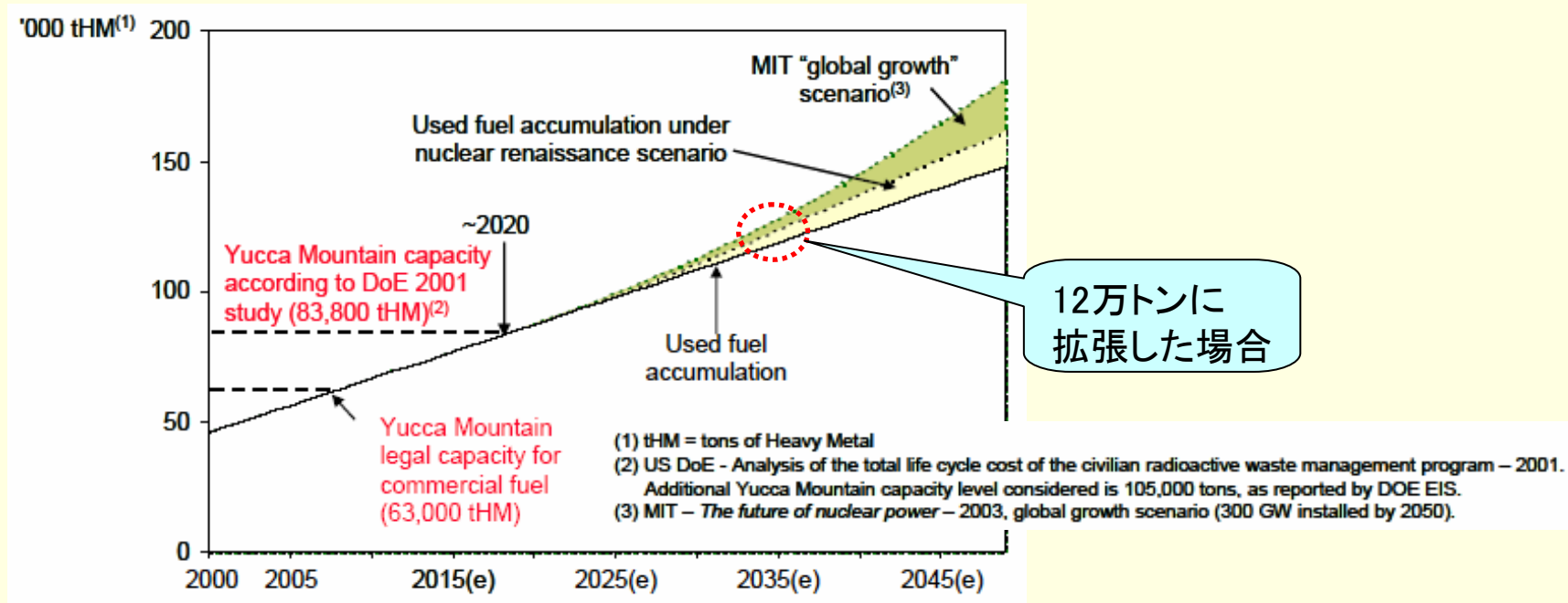
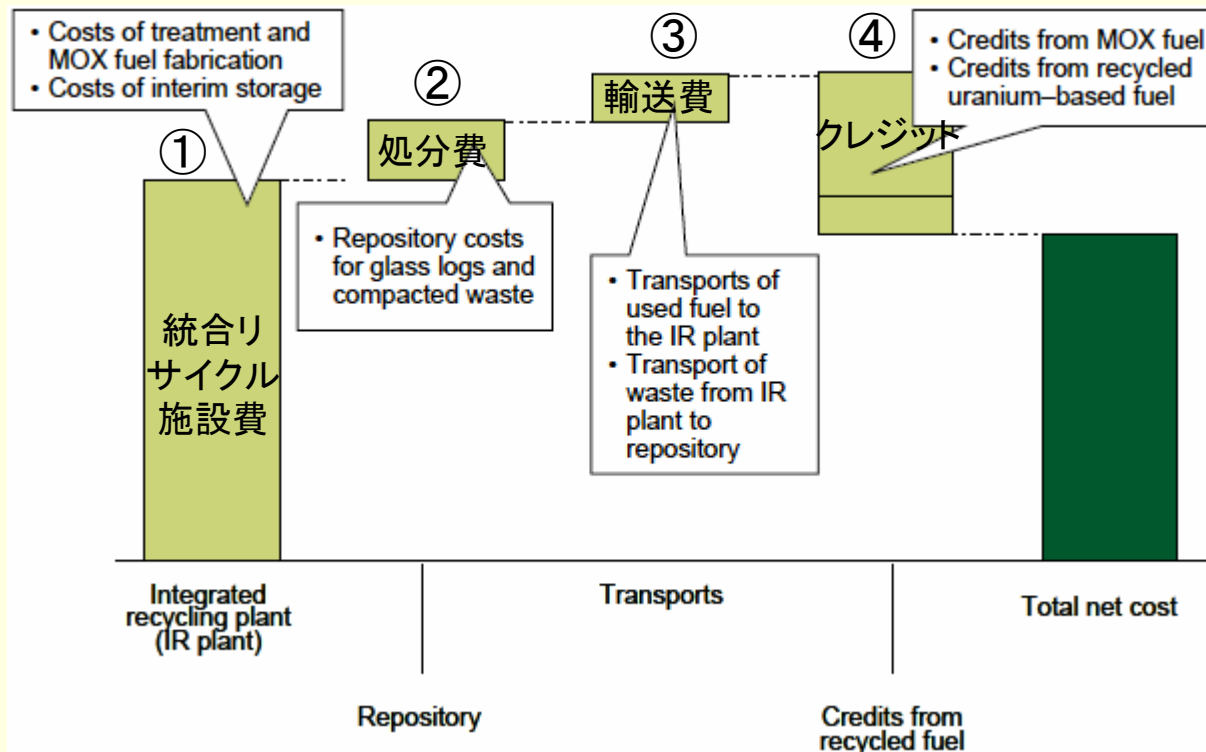


図 使用済燃料の累積発生量

## 2. 手法の概要（解析コストの構成）

### 再処理戦略のコスト構成の例

- ①統合リサイクル施設費（再処理費+MOX加工費）
- ②統合リサイクル施設からのHLW廃棄物（HLW-R）処分費
- ③使用済燃料、再生燃料、HLW-Rの輸送費
- ④再生燃料のクレジット



## 2. 手法の概要（アプローチ）

### 報告における2つのアプローチ

	Strategy considered...	Compared to...
Greenfield approach	<i>Recycling</i> Recycling plant and repository for high-level waste from recycling (HLW-R)	<i>Once-through</i> Repository for used fuel
Implementation Approach	<i>Portfolio</i> Recycling plant operational in 2020 and full-scale repository (Yucca Mountain) for legacy fuel and high-level waste from recycling (HLW-R)	<i>Once-through</i> Yucca Mountain repository for used fuel only with a possible expansion and followed by a second repository

### グリーンフィールド・アプローチ（1.3 にて説明）

「長期にわたる米国の使用済燃料再処理にはいくらかかるのか」

- －過去の原子炉サイトにおける貯蔵費は考慮しない
- －経済性の測定基準はバックエンド単価（\$/kg）
- －従来の再処理評価と同様のアプローチ

### インプリメンテーション・アプローチ（1.4 にて説明）

「処分場と連結した統合リサイクル施設の運用にはいくらかかるか」

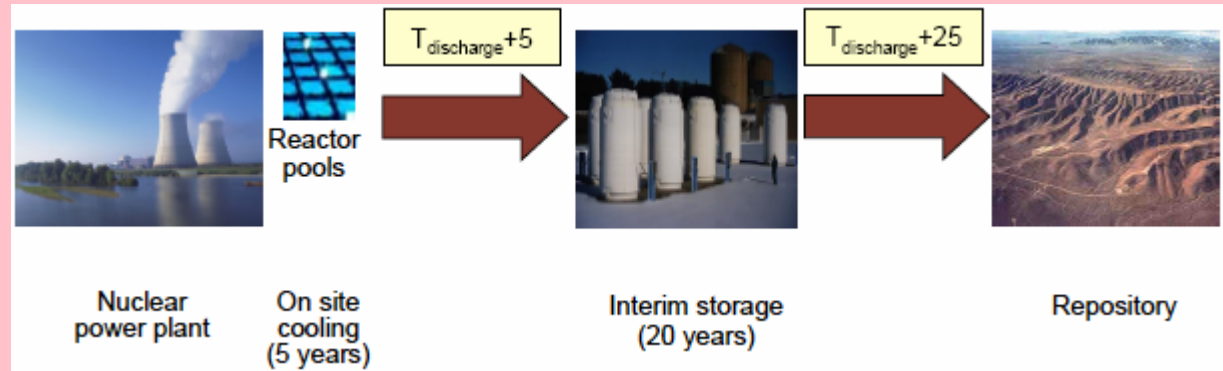
「処分場のみが開発されているワンスルー戦略とのコスト差はいくらか」

- －ユッカマウンテンの継続的開発
- －経済性の測定基準の総費用（\$）に加え、使用済燃料のフロー、資金需要

# 3. グリーンフィールド・アプローチ

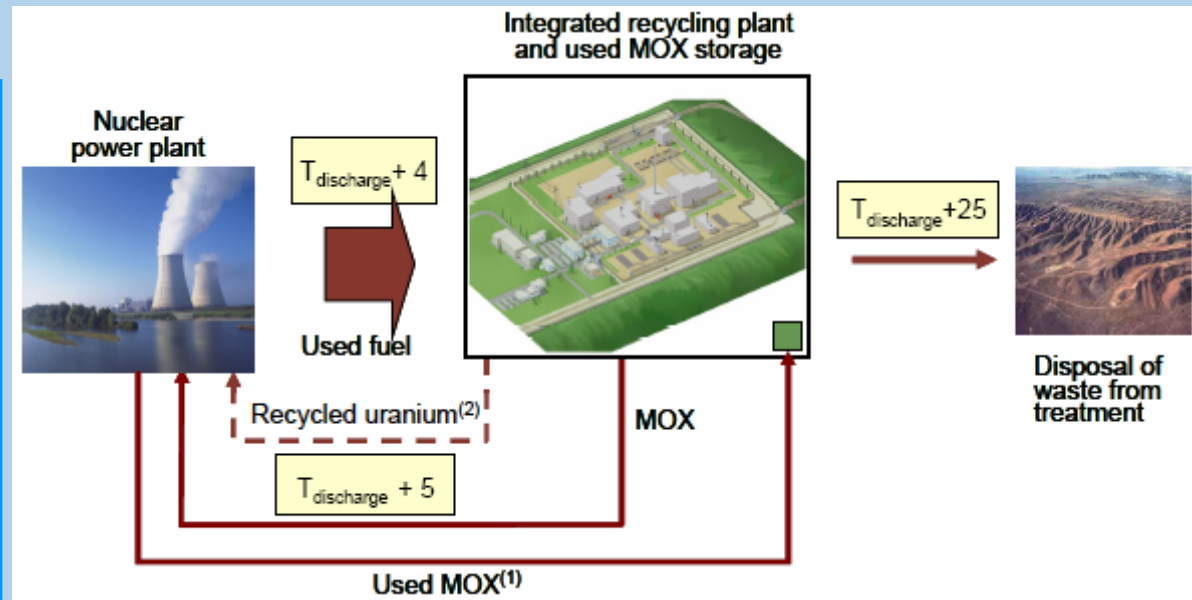
## ワンスルー戦略

炉サイトにて5年冷却  
↓  
中間貯蔵20年  
↓  
処分サイトへ輸送



## 再処理戦略

炉サイトにて3年冷却  
↓  
統合リサイクル施設にて  
1年冷却  
(Amの蓄積抑制のため)  
↓  
Pu-U→再生MOX燃料  
回収U→再生UOX燃料  
FP・MA→HLW-R  
HLW-R→ガラス固化  
↓  
統合リサイクル施設にて  
21年貯蔵  
↓  
処分サイトへ輸送

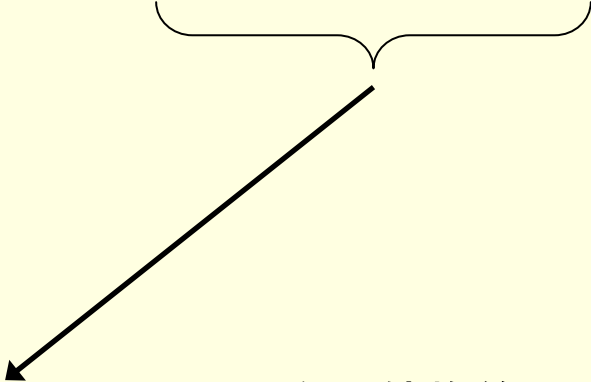


(1) Used MOX stored at integrated plant site in dedicated pools (less than 15,000 tons by 2070), for future use in fast reactors or multiple recycling.  
(2) Transformed in reactor fuel outside the recycling plant.

## 3.1 解析手法

### 再処理戦略のバックエンド単価(\$/kg)の例

$$\text{バックエンド単価} = \text{統合リサイクル施設単価} + \text{輸送単価} + \text{処分単価} - \text{クレジット}$$


$$\text{統合リサイクル施設単価} = \frac{\text{現在価値換算した総建設費、総運転費、総廃止措置費の和(\$)}}{\text{現在価値換算した総生産量(kg)}}$$

…その他、処分単価等も同様に計算

## 3.2 想定条件(基本的な想定)

	ワンスルー戦略	再処理戦略
基本的な想定	<ul style="list-style-type: none"> <li>①DOE2001報告書によるユッカマウンテンの計画に基づく</li> <li>②第2処分場はユッカマウンテンと同等の条件を仮定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①プルトニウムを単離しないCOEXプラントを2020年までに運開</li> <li>②既存のAREVAプラント(仏La Hague及びMelox)を基礎とした設計。再処理及び軽水炉MOX加工工程を有する</li> <li>③HLW-R、使用済MOX中間貯蔵施設を有する。</li> </ul>
処分規模または処理規模	ユッカマウンテンでは8万3,800トン処分可能 (法的な容量:6万3,000トン)	2,500トン/年(300日間/年稼動) (公称能力の約80%)
建設費	450～500億ドル 処分場完成までにかかる費用	160億ドル(オーバーナイトコスト) <ul style="list-style-type: none"> <li>①建設市場価格、コンティンジェンシー、開発、認可、HLW-R・使用済MOX中間貯蔵施設の建設コスト含む</li> <li>②既存AREVAプラントの経験に基づき、ガラス化及び固形廃棄物処理工程を最適化</li> <li>③追加コストとコンティンジェンシーは、米国特有の認可及び設計要求、開発コストなどにより決定</li> </ul>



## 3.2 想定条件(各サイクル単価)

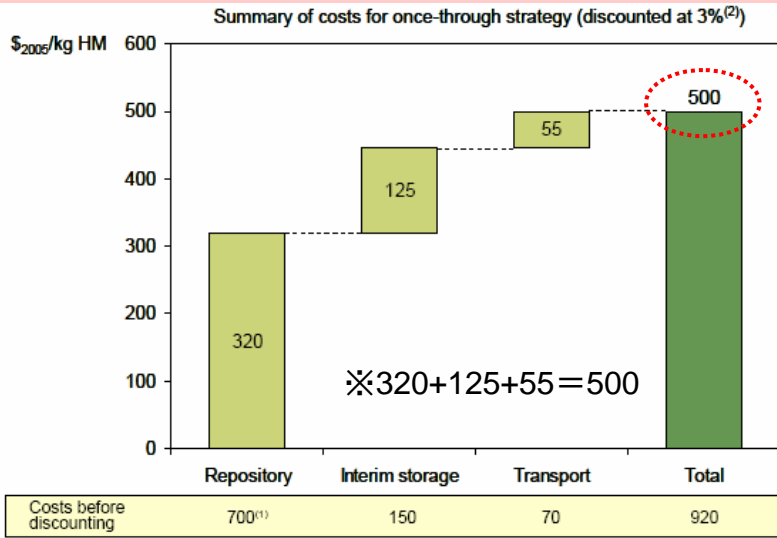
	ワンスルー戦略	再処理戦略
統合リサイクルプラント単価		\$630/kg 運転費:\$9億/年
処分単価	\$700/kg DOE2001の研究に基づく	\$175/kg HLW-Rは使用済燃料の4倍濃密に処分
中間貯蔵輸送単価	中間貯蔵: ~\$150/kg 発電所→処分場(使用済燃料輸送): \$70/kg	\$95/kg(割引前) 発電所→統合リサイクル施設(SF): \$75/kg (2,800トン/年: 過去発生分: 700トン、 新燃料発生分1,800トン、使用済MOX300トン) 統合リサイクル施設→処分場(HLW-R): 20ドル/kg
再生燃料のクレジット		MOXクレジット: 160\$/kg(加工コスト含まず) UOXクレジット: 30\$/kg(転換、濃縮、加工コスト) ウラン価格: \$31/lb U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (2005年の6ヶ月平均) 濃縮コスト: \$110/SWU 転換コスト: \$12/kgU 加工コスト\$200/kgHM 再生MOX燃料、再生UOX燃料市場価格: 2020年を基準(OECD/IAEAのUranium2003より)

# 3.3 解析結果（各戦略のバックエンド単価）

（割引率3%）

## ワンスルー戦略

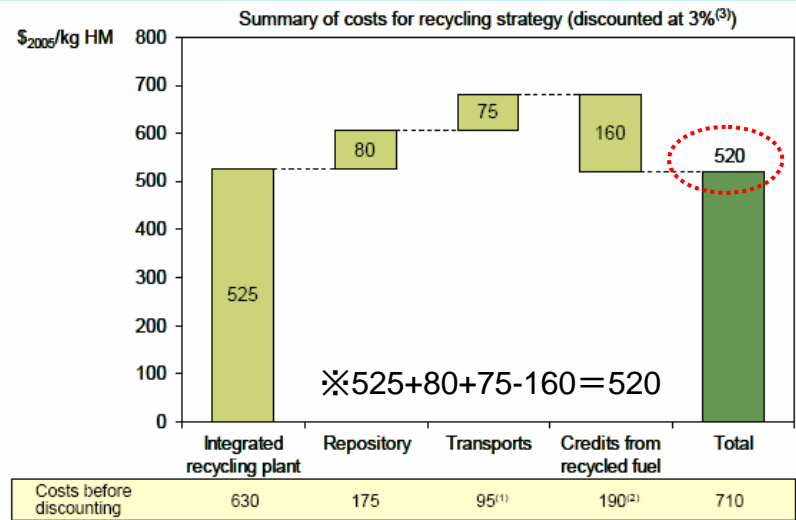
バックエンド単価: \$500/kg



(1) Includes \$25 for the construction of a repository transportation railroad.  
 (2) According to guidance from Office of Management and Budget. See US OMB, Office of Economic Policy – Circular A-94: Main guidance for cost/benefit analysis and discount rates – 1992 and US OMB, Office of Economic Policy – Circular A-4: Discounting for long term projects – 2003.

## 再処理戦略

バックエンド単価: \$520/kg

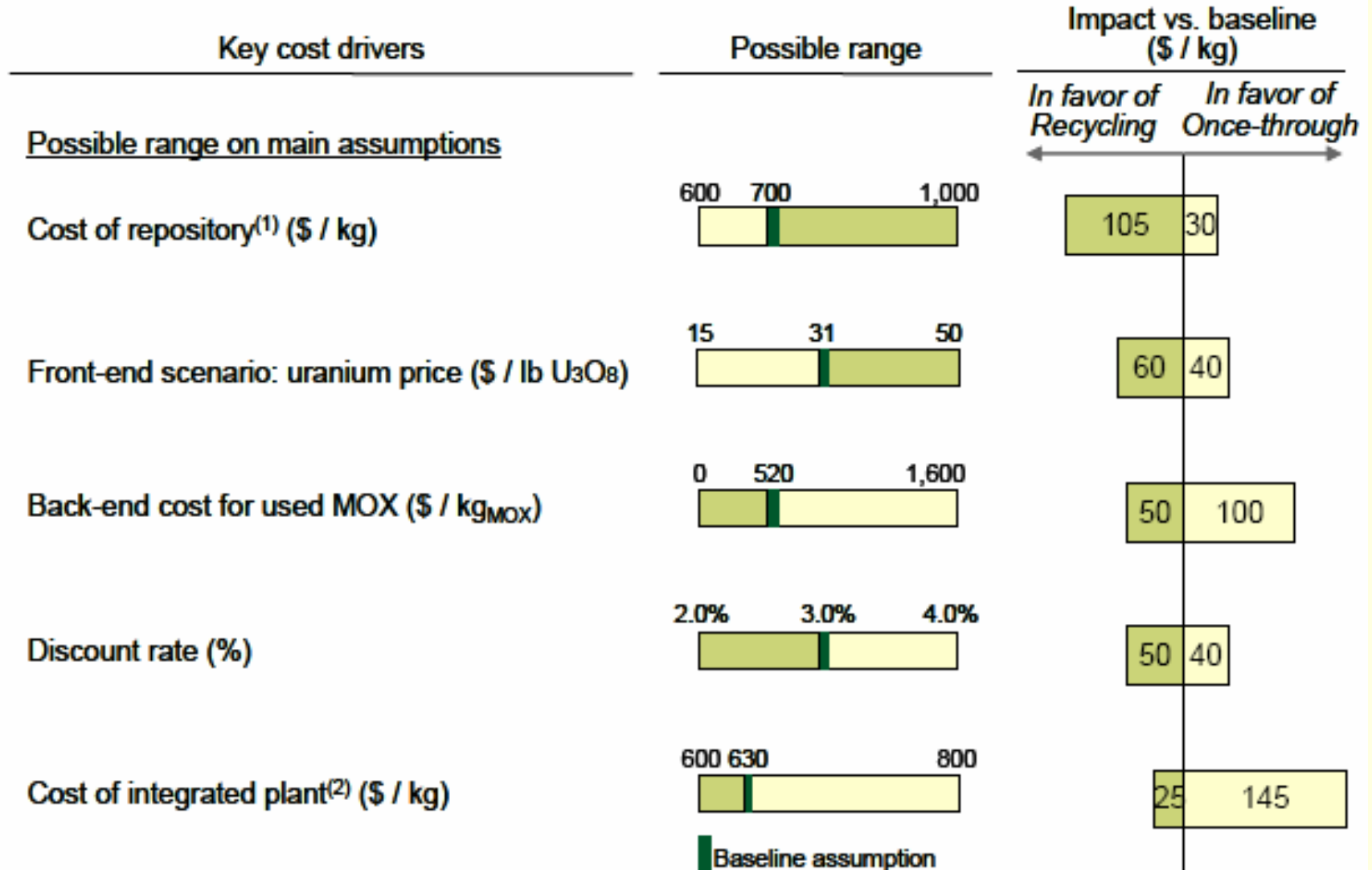


(1) \$75/kg to transport the used fuel from the nuclear plant sites to the recycling plant and \$20/kg to transport the HLW-R from the recycling plant to the repository.  
 (2) \$180/kg for credits from MOX and \$30/kg for credits from recycled uranium-based fuel.  
 (3) According to guidance from Office of Management and Budget. See US OMB, Office of Economic Policy – Circular A-94: Main guidance for cost/benefit analysis and discount rates – 1992 and US OMB, Office of Economic Policy – Circular A-4: Discounting for long term projects – 2003.

### これまでの評価との違い

- 統合リサイクル施設単価が大幅に安い
- 処分場の処分密度が4倍

# 3.3 解析結果(感度解析)



(1) Excluding transport. lower bound: average cost of Yucca Mountain for 120,000 tons, higher bound: budget overrun at +40%.

(2) Total life cycle undiscounted cost of integrated plant is \$84B (25% of which is capital investments). Lower bound of the sensitivity range equates to \$81B in total life cycle costs, upper bound is \$81B. CapEx/OpEx split kept constant.

# 4. インプリメンテーション・アプローチ

ワンスルー戦略

再処理戦略(ポートフォリオアプローチ)

Once-through strategy  
(for reference)

Recycling through  
a portfolio strategy

Yucca Mountain

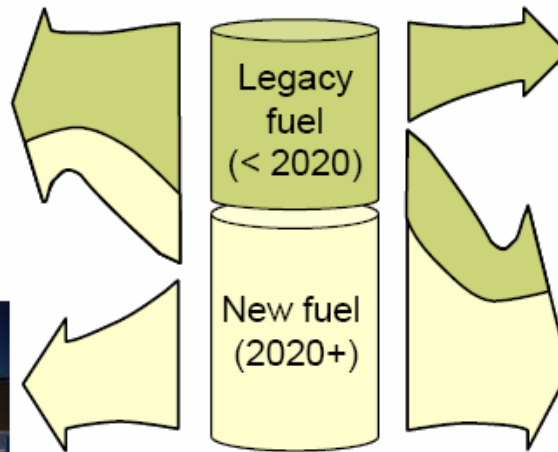


+



New repository

Interim storage

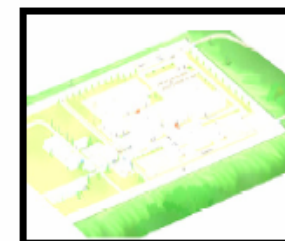


Total used fuel quantity  
1968 – 2070

Yucca Mountain



+



Integrated recycling plant

HLW-R

Used MOX

2070年までに生成された商用使用済燃料を管理

# 4.1 解析手法・想定条件

## 統合再処理費 正味現在価値

正味現在価値(NPV) = 現在価値換算した総建設費、総運転費、総廃止措置費の和

・・・その他HLW-R処分費等も同様に計算

### 想定条件

	ワンスルー戦略	再処理戦略(ポートフォリオアプローチ)
基本的な想定	①処分場容量8万3,800トンのケース (第2処分場は2020～2070年に発生した使用済燃料処分に必要) ②12万トンに拡張したケース (12万トンに拡張した場合、第2処分場は2035～2070年に発生した使用済燃料処分に必要)	①2020年までに生成された使用済燃料は2020年で約40%再処理。 ②2020年以降発生する使用済燃料は全量再処理 ③統合リサイクル施設は50年間稼働 ④2070年までに生成される使用済燃料は全量処理可能(12万5,000トンの過去及び新使用済燃料を再処理、5万トンの過去の使用済燃料は直接処分)

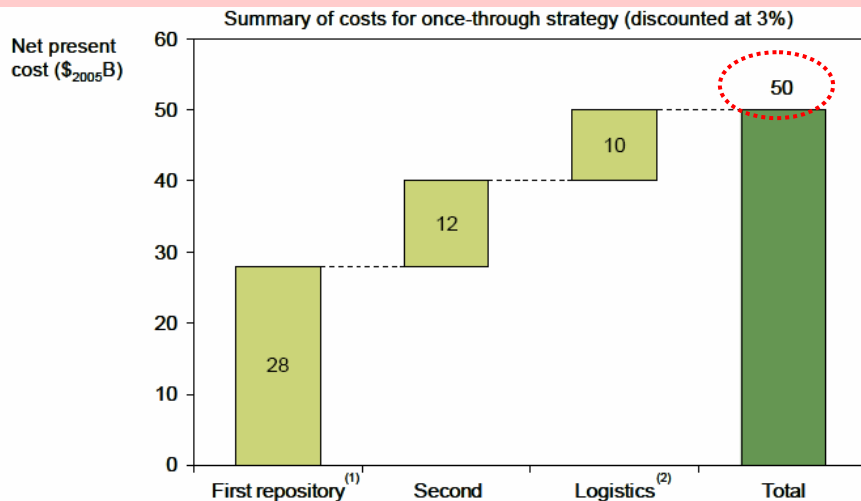
# 4.2 解析結果(各戦略の総費用)

(割引率3%)

## ワンスルー戦略

**470~500億ドル**

コスト範囲は処分場容量に依存  
(8万3,800トンまたは12万トン)



Total life cycle costs <sup>(1)</sup> (\$2005B)	48	51 <sup>(3)</sup>	31	130
-------------------------------------------------	----	-------------------	----	-----

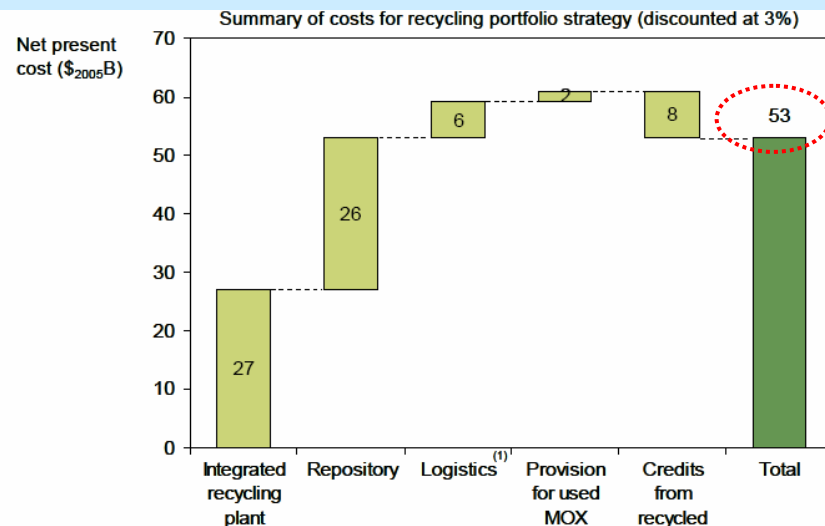
(1) Adjusted for differences in volume of used fuel handled in once-through strategy vs. portfolio.  
 (2) Includes transport and interim storage.  
 (3) Cost of second repository different from first repository due to lower annual volume of used fuel emplaced. No backlog of legacy fuel results in an annual fuel flow of 2,100 tons a year (vs. 3,000 for Yucca Mountain) and a longer period of emplacement.

(上図は処分容量8万3,800トンと仮定)

## 再処理戦略(ポートフォリオアプローチ)

**480~530億ドル**

直接処分: 過去の使用済燃料処分5万トン  
 統合リサイクル施設(2020年稼動):  
 過去の使用済燃料3万5,000トン  
 新使用済燃料 9万トン  
 コストの範囲は処分場操業時期に依存



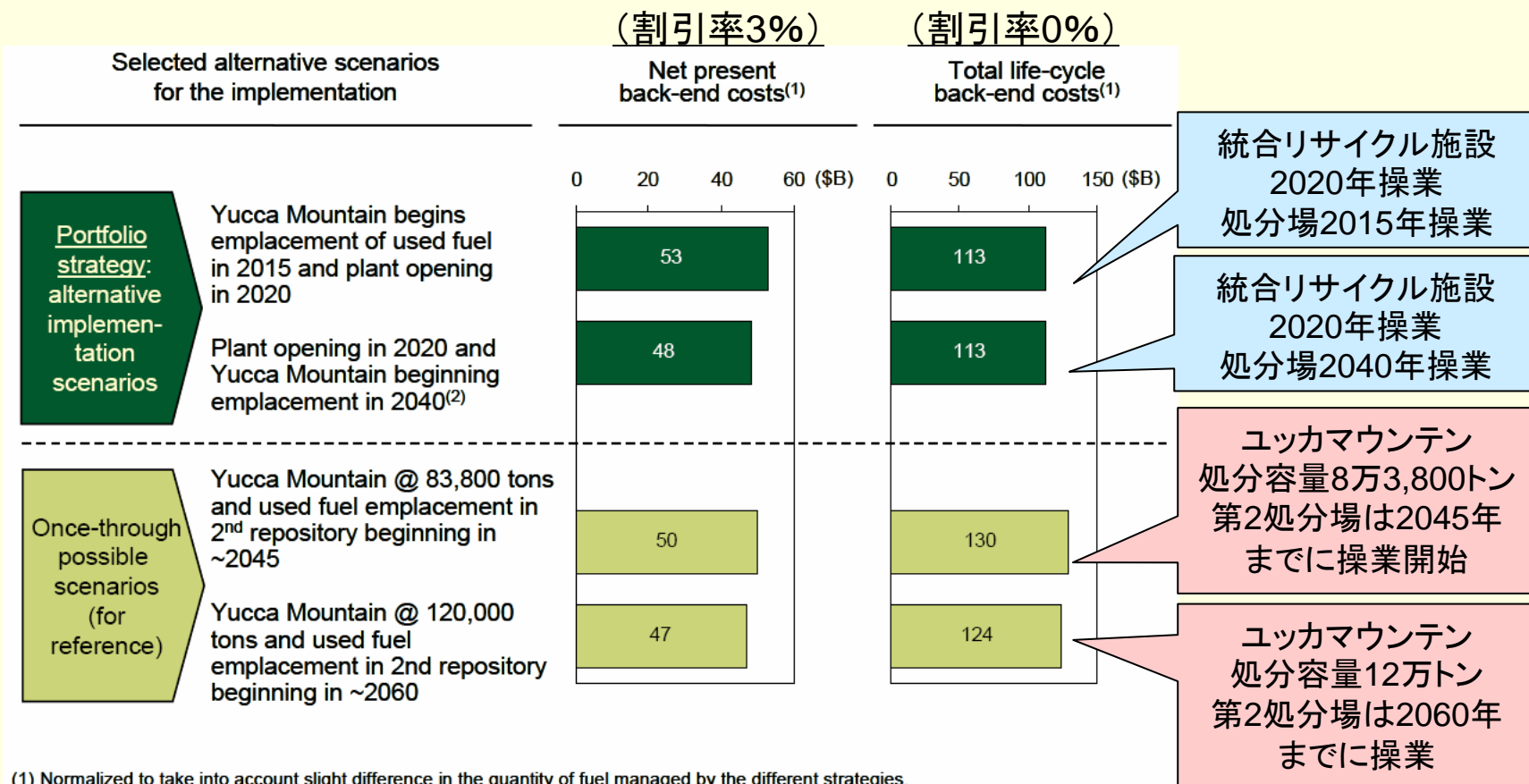
Total life cycle costs (\$2005B)	64	49	16	8	24	113
----------------------------------	----	----	----	---	----	-----

(1) Includes transports.

(上図は2015年に処分場操業と仮定)

# 4.2 解析結果（総費用・感度解析）

<b>ワンスルー戦略</b>	<b>再処理戦略（ポートフォリオアプローチ）</b>
<p><b>1,240～1,300億ドル（割引率0%）</b>                  割引した場合、処分までのラグタイムが長い分、再処理戦略より有利になる</p>	<p><b>1,130億ドル（割引率0%）</b>                  ワンスルー戦略に匹敵する</p>



(1) Normalized to take into account slight difference in the quantity of fuel managed by the different strategies.

(2) Not considering possible impact on the costs for non-commercial fuel.

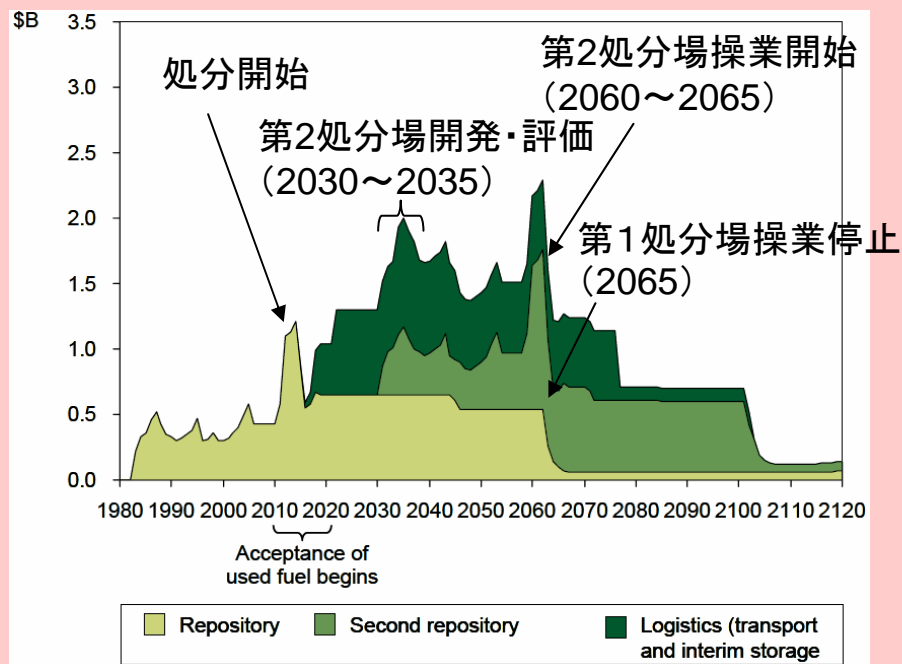
Note: Assuming similar costs for back-end of used MOX as for used UOX - U price at \$31/lb.

# 4.2 解析結果(キャッシュフロー)

## キャッシュフロー

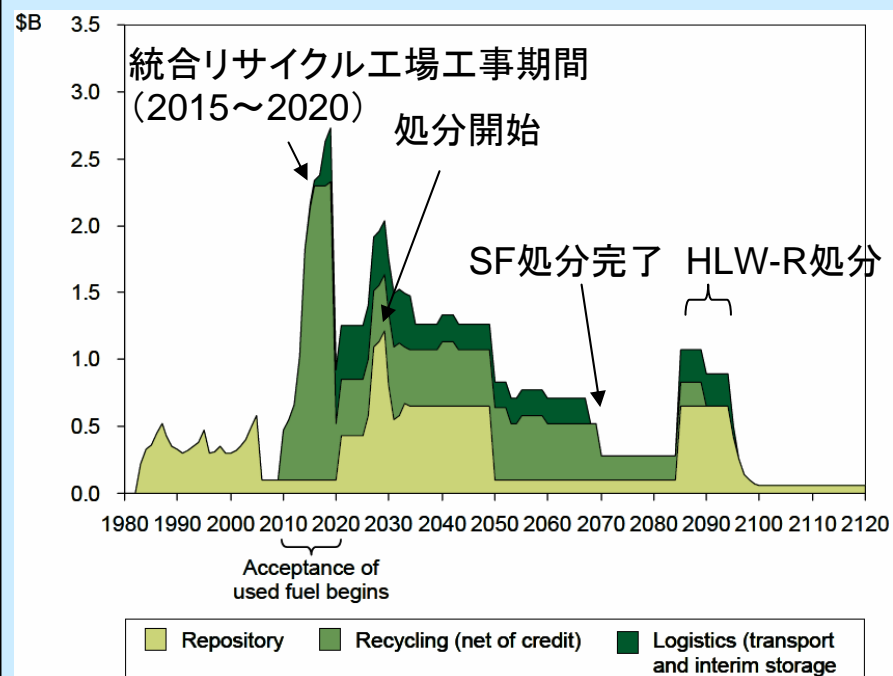
### ワンスルー戦略

総費用: 1,240億ドル(割引率0%)  
 (ユッカマウンテン処分容量12万トン)



### 再処理戦略(ポートフォリオアプローチ)

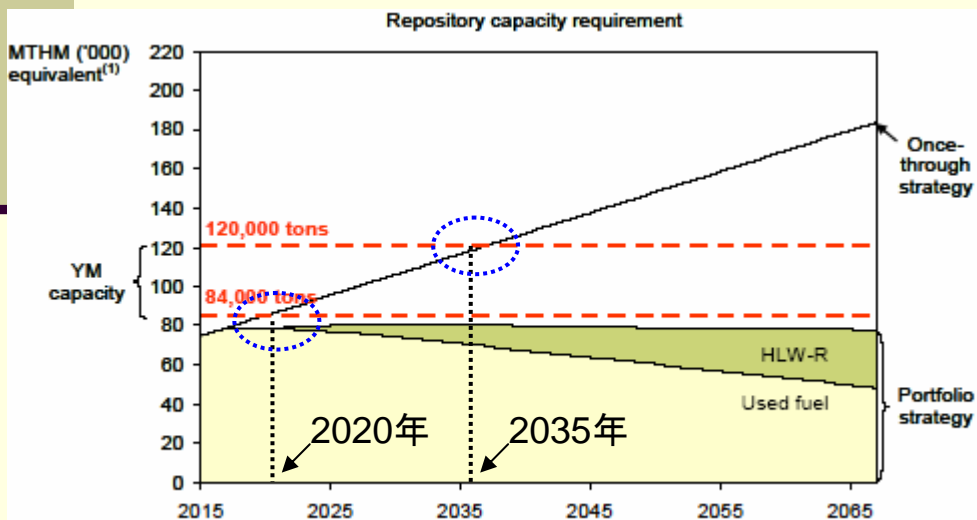
総費用: 1,300億ドル(割引率0%)  
 (ユッカマウンテン2030年操業)





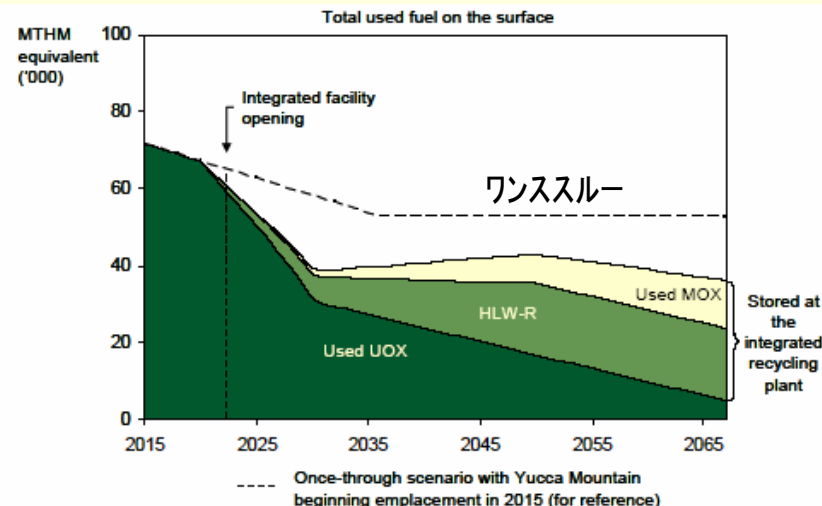
# 4.3 燃料フローの観点から見た再処理ポートフォリオ戦略の利点

	ワンスルー戦略	再処理ポートフォリオ戦略
処分場容量 (左下の図)	処分場容量を8万3,800トンとした場合、2020年以降新たに発生する使用済燃料処分のために、(25年間の冷却期間を考慮して) 2045年以降には第2処分場が必要となる。 処分場容量を12万の場合、2060年以降には第2処分場が必要となる。	①少なくとも2070年まで追加処分容量が不要 ②使用済燃料(薄緑色): 2020年以降減少 ③全ての新使用済燃料は再処理、過去分は部分的に再処理(~700トン/年) ④HLW-R(緑色): 徐々に増加 再処理使用済燃料: 2,500トン/年 HLW-R: 650トン→処分
地表の使用済燃料の蓄積 (右下の図)	ユッカマウンテン操業2015年の場合、統合リサイクル施設操業の数年後までにユッカマウンテンが操業しなければ地表の過去の使用済燃料は減少しない。	長期的に地表のHLWを減少 発生時期: HLW-R 2020年 使用済MOX 2025年
取出し直後の熱い燃料の除去	新たに発生する使用済燃料(冷却槽貯蔵5年)のための追加の冷却槽容量必要	冷却槽貯蔵3年以内...追加の冷却槽必要ない



(1) Equivalent to MTHM ('000) of used fuel disposed in the repository (i.e., HLW-R takes only 1/4 of the space from equivalent used fuel)

処分場容量の合計



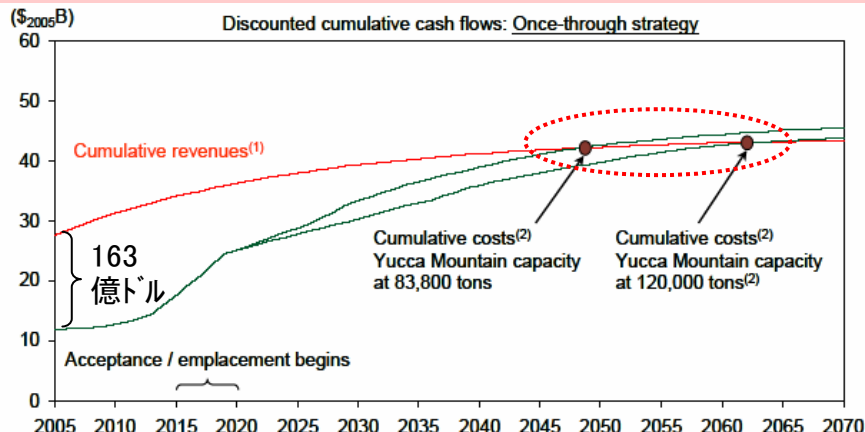
Note: HLW-R is reduced by the densification factor: HLW-R from the treatment of 1 tHM of used fuel is represented as 0.25 tHM (factor of 4). On the other hand, used MOX quantity is presented in tHM and not in densification factor, as used MOX is not intended to be disposed in Yucca Mountain (see appendix 10 for more details).

ポートフォリオ戦略におけるSFの蓄積

# 4.4 必要な資金条件の解析

- 商用使用済燃料管理に対する費用は連邦核廃棄物資金から支出
- 解析における仮定
  - －現在の料金体系は不変。1ミル/kWh
  - －2004年末における利用可能な正味の資金は163億ドル

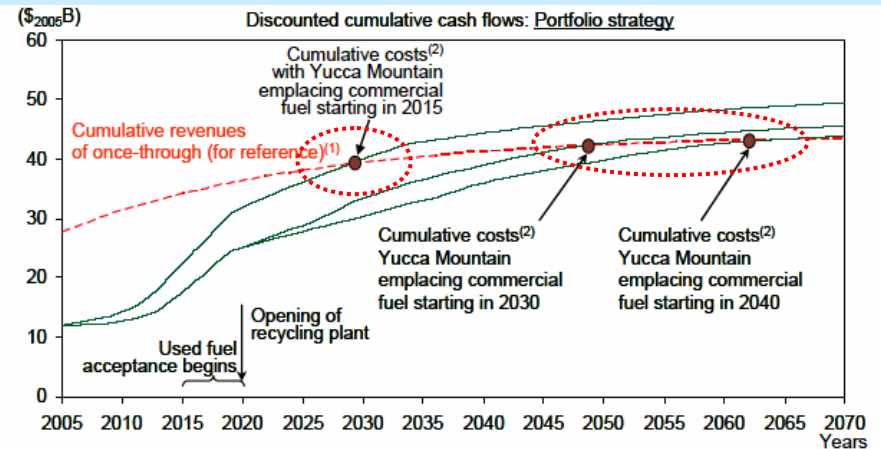
## ワンスルー戦略



(1) Assuming 2% inflation per year and fee at 1mil / kWh nominal. Assumes initial net balance of NWF to be \$16.3B in 2005.  
 (2) Excluding cost of interim storage of legacy fuel (assumed to be directly sent to Yucca Mountain from power plants).  
 Note: Does not considering link with decision / costs on DoE and Navy fuel.

- －処分容量12万トンに拡張した場合、第2処分場設置のための費用発生が遅い
- －2045-2060年までは連邦核廃棄物資金の1ミル/kWhで賄える

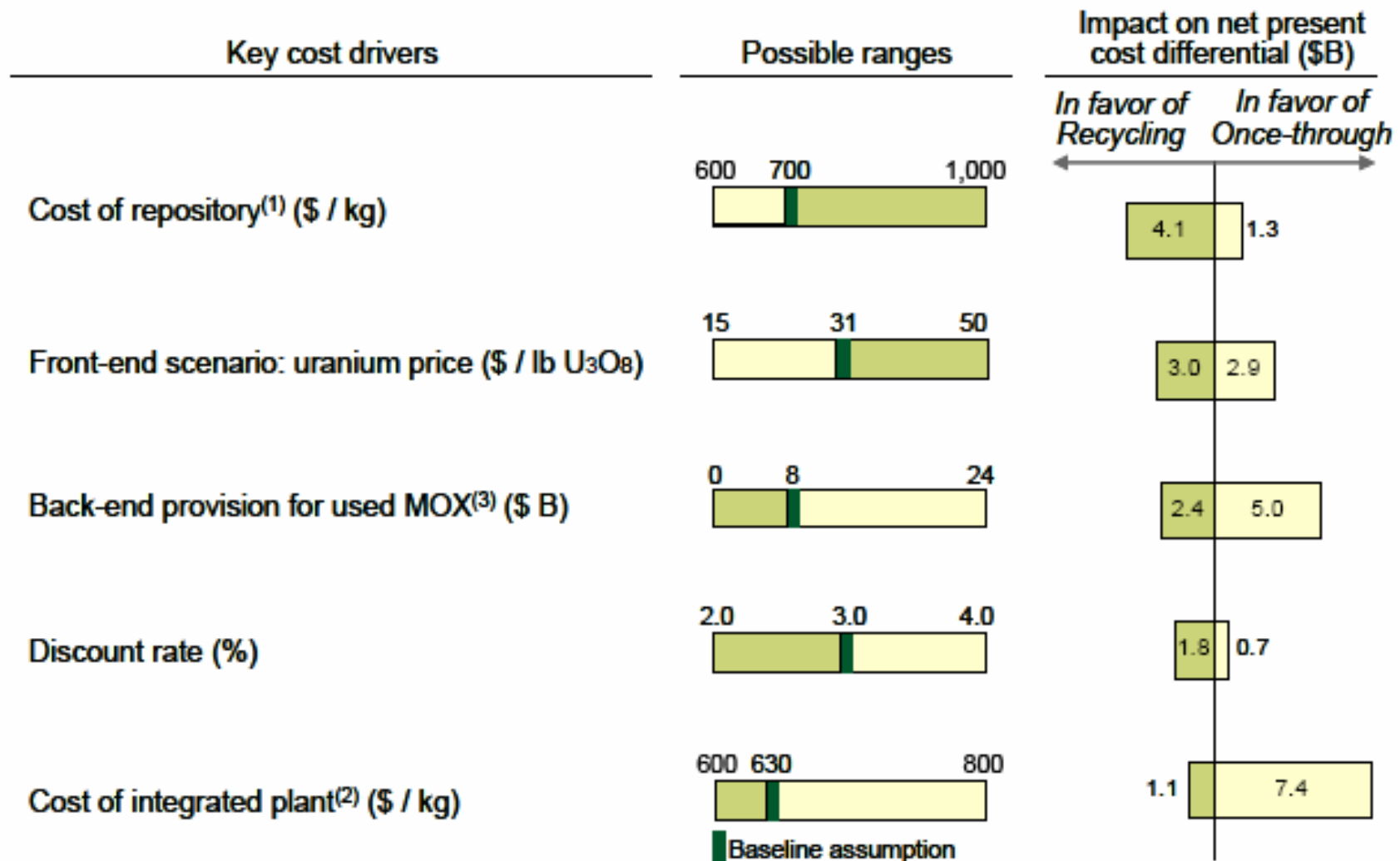
## 再処理ポートフォリオ戦略



(1) Assuming 2% inflation per year and fee at 1mil / kWh nominal. Assumes initial net balance of NWF to be \$16.3B in 2005.  
 (2) Net of credit (recycling), excluding cost of interim storage of legacy fuel (assumed to be directly sent to Yucca Mountain from power plants).  
 Note: Does not considering link with decision / costs on DoE and Navy fuel.

- －ユッカマウンテン2015年開始の場合、2030年までワンスルー戦略と同じ資金計画で可能
- －ユッカマウンテン操業開始が再処理操業開始の2020年より遅い場合、2050年以上まで同じ資金内で可能

# 4.5 解析結果(感度解析)



(1) Excluding transport. lower bound: average cost of Yucca Mountain for 120,000 tons, higher bound: budget overrun at +40%.

(2) Total life cycle undiscounted cost of integrated plant is \$64B (25% of which is capital investments). Lower bound of the sensitivity range equates to \$61B in total life cycle costs, upper bound is \$81B. CapEx/OpEx split kept constant.

(3) Baseline assumption based on a unit cost of \$520/kg for disposing of used MOX, equivalent to the estimated long-term cost of disposing regular used fuel.

## 5. BCG報告書の結論(1/2)

統合リサイクル施設によるリサイクルは、米国における長期の使用済燃料の管理上、魅力的となりうる。ウラン価格や処分コストといった不確実性を考慮するとなおさらである。

### リサイクル(再処理)ポートフォリオ戦略の利点

- 2070年まで処分場容量を8万3,800トンから追加する必要なし
- 炉サイトにおける使用済燃料在庫の削減。特に発熱量の大きな取り出し直後の使用済燃料の削減と中間貯蔵施設への追加投資の削減
- 既存技術の改良で対応可能。将来、高速炉サイクルへの移行が可能
- 現在の資金調達(連邦核廃棄物資金1ミル/kWh)の面からは、ユッカマウンテン2015年開始の場合2030年まで対応可能であり、リサイクル施設運転開始後に開始した場合には2050年以降まで対応可能
- ウラン価格と濃縮費に影響されない再生MOX燃料と再生ウラン燃料を供給することで、ウラン価格の上昇が起こっても対抗する手段を原子力産業に提供

### リサイクル戦略成功の鍵

- 原子力産業界におけるリサイクル燃料に対する広範な受容
- リサイクルに対する肯定的な法的、政治的、経済的な環境の整備
- (量は限定的だが)使用済MOX燃料を管理するための多重リサイクルや高速炉での利用などの時間的に柔軟な最適解の構築

# 5. BCG報告書の結論(2/2)

## BCGによる次のステップの提案

- 本レポートを含む最近の燃料サイクル管理の提案に関して、主要な政策決定者と産業界のリーダーとの建設的対話(目的は、リサイクルポートフォリオ戦略や他の戦略の利点について、いくつかの問題点を特定した上で合意すること)
- 以下の点を考慮したリサイクルポートフォリオ戦略のための詳細な事業計画の立案
  - ー包括的な実施スケジュールやライセンス/承認を含む技術ロードマップ、使用済MOX燃料の管理等の追加の技術的観点
  - ー資金調達及び操業形態といった商業的観点および潜在的な官民のパートナーシップ
  - ー核不拡散といった政策的観点
- 上記のステップの確立と全体的なロードマップの立案

## 6. 報告書発行後の主な動き

- BCG報告書の発行は2006年7月25日であったが、8月3日にDOEはGNEPの2トラック方式(第1トラック:短期、第2トラック:長期)をプレスリリースで発表し、関心表明(EOI: Expression of Interest)を世界的に募集
- 2トラック方式では、特に第1トラックにおいて、従来のUREX+1aプロセスを用いるESD(Engineering-Scale Demonstration)に代わり、BCG報告書の統合リサイクルプラント(Integrated Recycle Plant)に類似した下記の特徴を持つ統合燃料処理センター(Consolidated Fuel Treatment Center)が記載
  - ー現在または近い将来に利用可能な技術
  - ーPuを単離しない技術
  - ー処理規模は100～1,000トン/年(米国全体では2,000～3,000トン/年必要)
- その後、AREVA社は米企業と共にEOIを提出
- わが国もJAEAが中心となってEOIを提出。提案した再処理プロセスは、第1トラック用がPUREXを改良したプロセスであるCo-processing法であり、第2トラック用がFBRサイクル実用化戦略調査研究で主概念として選定されたNEXT法である

# 7. 今後のわが国への影響 (GNEPの動向)

