

平成18年度 敦賀「原子力」夏の学校

ウラン資源の 有効活用を目指して ～ 核燃料サイクル ～

2006年9月12日

日本原子力研究開発機構

執行役 地層処分研究開発部門長

河田 東海夫

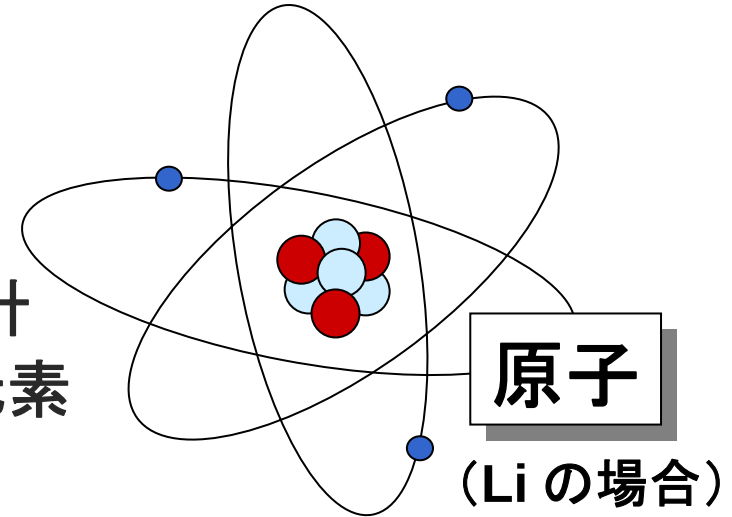


歴史編

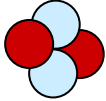
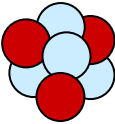
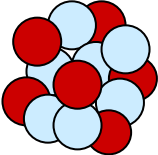
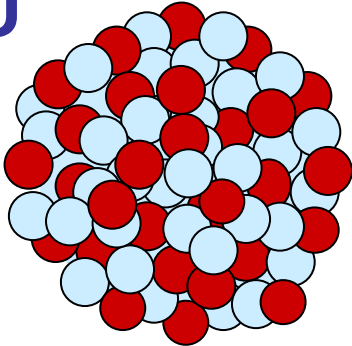
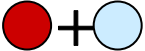
原子力（核燃料サイクル）の
原点は、人工元素、すなわち
「超ウラン元素」の探求・・・

原子と原子核

- 原子番号は陽子の数
- 質量数は陽子と中性子の数の合計
- ウランは天然に存在する最大の元素



原子核

H	He	Li	...	O	...	U
			...		...	
1	2	3	...	8	...	92
 +  1	 +  4	 +  7	...	 +  16	...	 +  238

● 電子(-)

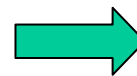
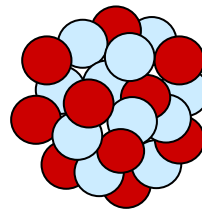
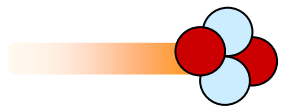
● 陽子(+)

● 中性子

原子核の発見と人工核変換

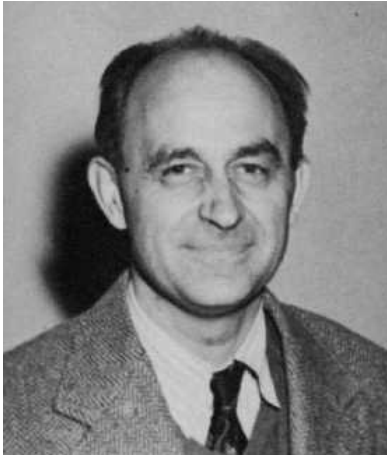
- 1911年：原子核の発見（ラザフォード）
- 1932年：中性子の発見（チャドウィック）
- 1934年： α 線照射による人工放射性核種生成（フレデリック・ジョリオとイレーヌ・キュリー夫妻）

アルファ線照射

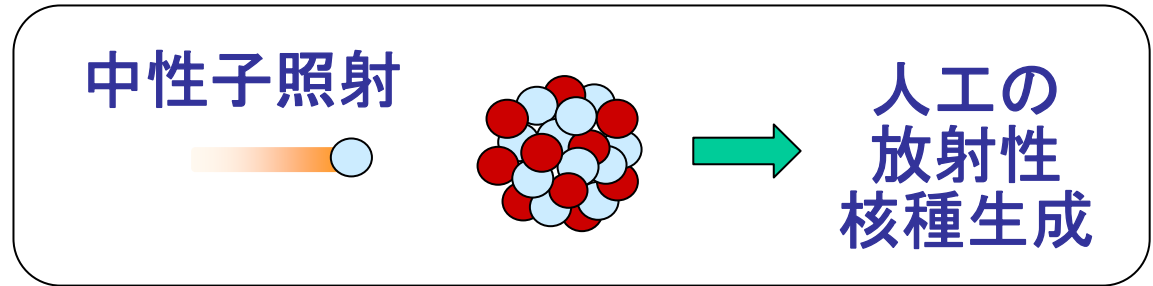


人工の
放射性
核種生成

中性子照射による人工核種の生成



エンリコ・フェルミ(イタリア)
1938年ノーベル賞受賞

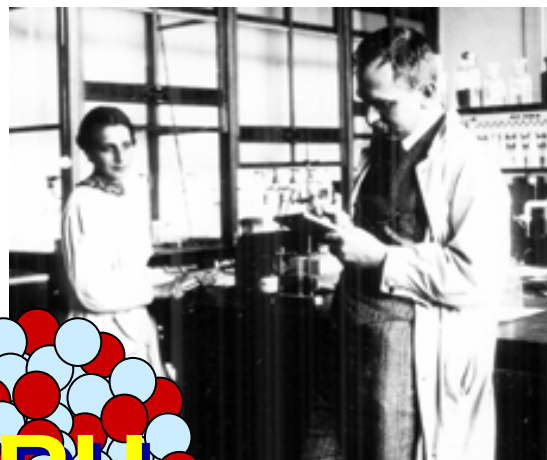
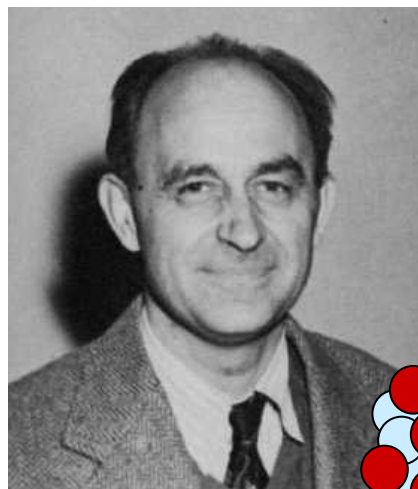


- フェルミの発見(1934～1938年)
 - 中性子はパラフィンなどで「減速」される
 - 中性子を減速させて照射すると人工核種生成効率が向上
 - 減速した中性子(熱中性子)でウランを照射すると強い放射能を持つ核種が生成する → 超ウラン元素の生成?
- 世界中の研究者が競ってウランの中性子照射の研究(超ウラン元素の探求)

世界の研究者が競って 超ウラン元素 (TRU) の探求を開始

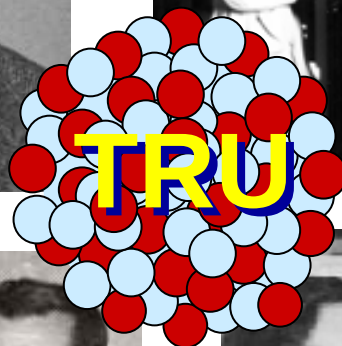
イタリア

エンリコ・フェルミ



ドイツ

オットー・ハーン
リーゼ・マイトナー



フランス

ジョリオ・キュリー
夫妻



米国

アーネスト・
ローレンス
グレン・
シーボーグほか

これは超ウラン元素ではなく
バリウムとしか考えられない！！



オットー・ハーン
(1944年ノーベル化学賞)

- 1938年暮、オットー・ハーンとフリッツ・シュトラースマン



ドイツ、カイザー・
ヴィルヘルム研究所

1938年暮、雪に覆われた スウェーデンの田舎町クンゲルフで...

- ドイツを追われたリーゼ・マイトナーは、甥のオットー・フリッシュとクリスマス休暇を過ごした。
- マイトナーのもとにハーンからの手紙が届いた...



リーゼ・マイトナー
(オーストリア人)
長年にわたるハー
ンの共同研究者

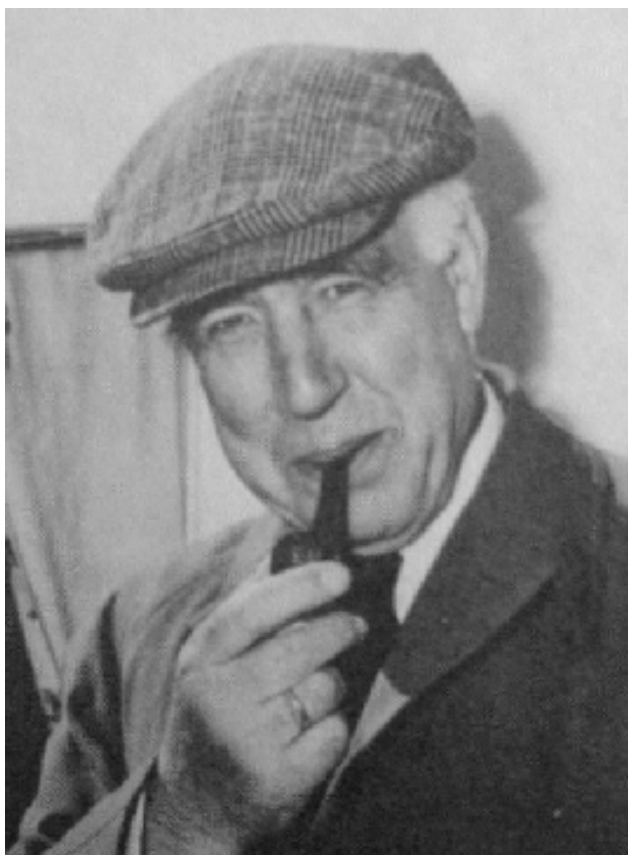


オットー・
フリッシュ

ウランの原子核は 外乱で歪むと壊れる！！

- マイトナーとフリッシュは、**ボーアの液滴モデル**で、**ウランが核分裂**を起こしうることを解明。
- その際、**200MeVのエネルギー**が放出されることも明らかにした。
- 核分裂発見の報は、年明けの1月3日、フリッシュから米国に出発寸前のニールス・ボーアに伝えられた。

1939年1月16日、ニールス・ボーアは ニュー・ヨーク港に到着した



ニールス・ボーア
(原子物理学の父)

- 核分裂発見の報
はたちまち全米の
科学者の間に拡が
り、各地の大学で
核分裂を確認する
実験が一斉に開始
された。

アインシュタインからルーズベルト大統領への警告

Albert Einstein
Old Grove Rd.
Nassau Point
Peconic, Long Island

August 2nd, 1939

F.D. Roosevelt,
President of the United States,
White House
Washington, D.C.

Sir:

Some recent work by E.
communicated to me in manuscript
ium may be turned into a new
mediate future. Certain aspects
to call for watchfulness and
of the Administration. I believe
to your attention the following

In the course of the last
through the work of Joliot in



アインシュタインとレオ・シラード

ドイツの原爆開発の可能性を
警告。米国での研究着手を勧告

com-
uran-
im-
seem
rt
ring
ble -
in

プルトニウムの発見



1940年 12月
グレン・シーボーグ

カリフォルニア大バークレイ校
(後にノーベル賞受賞)

その後、プルトニウムも
核分裂することを発見

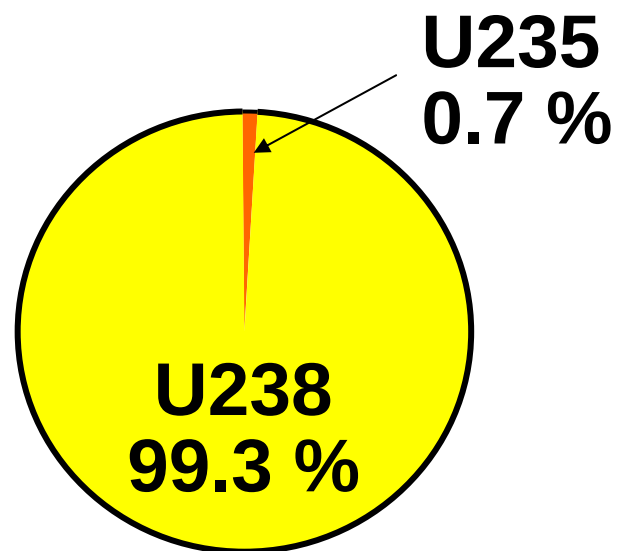
新惑星の命名法にならない
プルトニウムと命名

- プルート(冥王)
 - 死者を支配する地底の神
 - 大地の富を支配する神

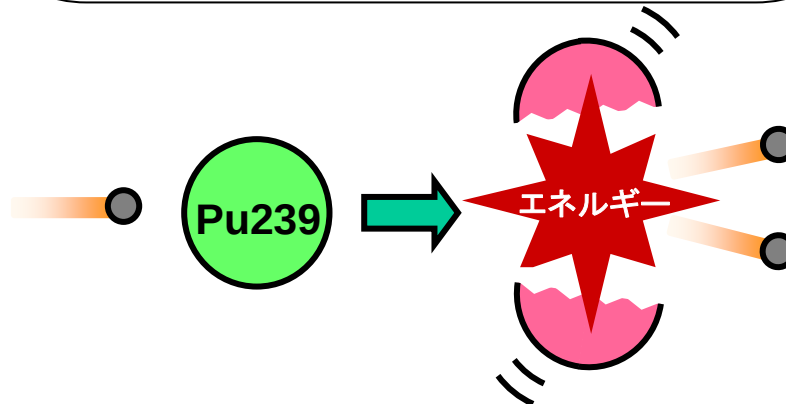
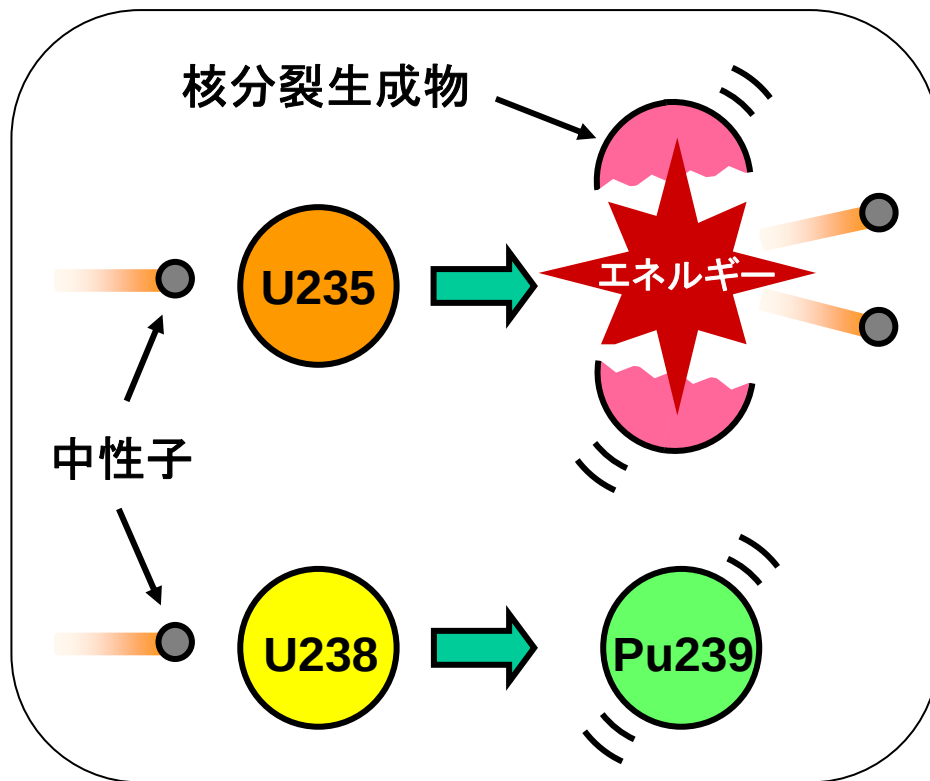


古代ローマの壺に描かれたプルート
(ハーバード大学博物館)

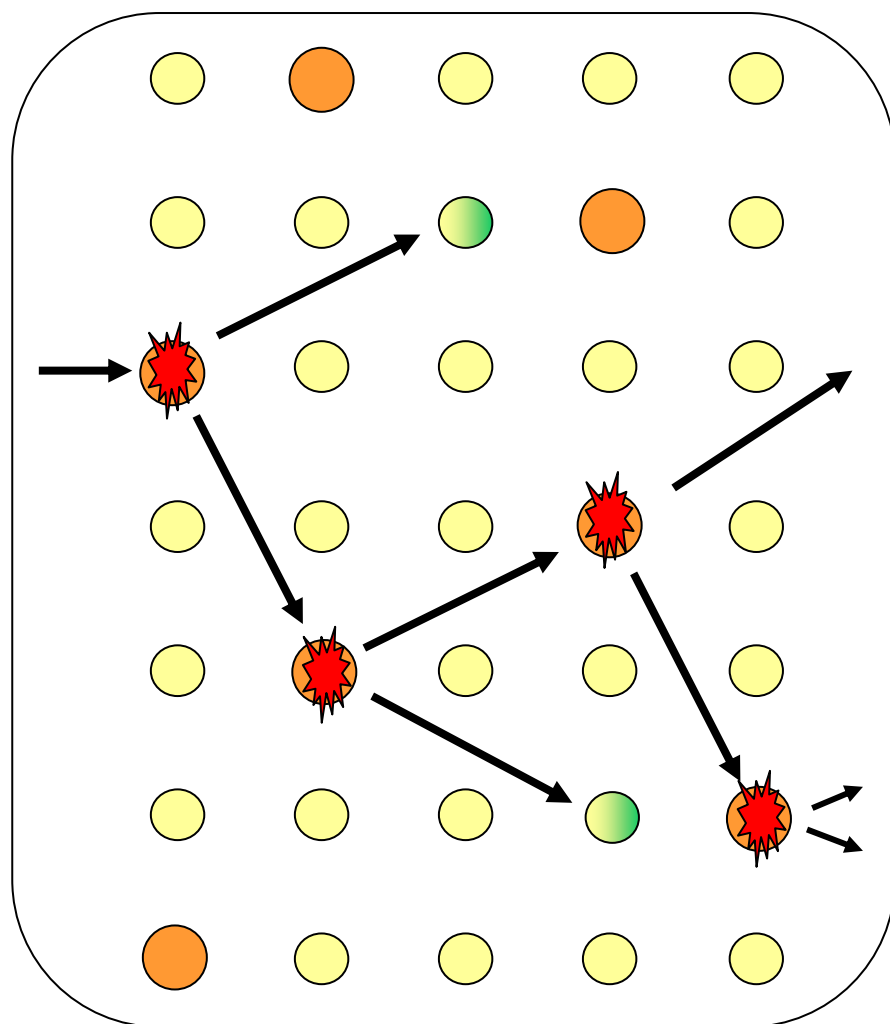
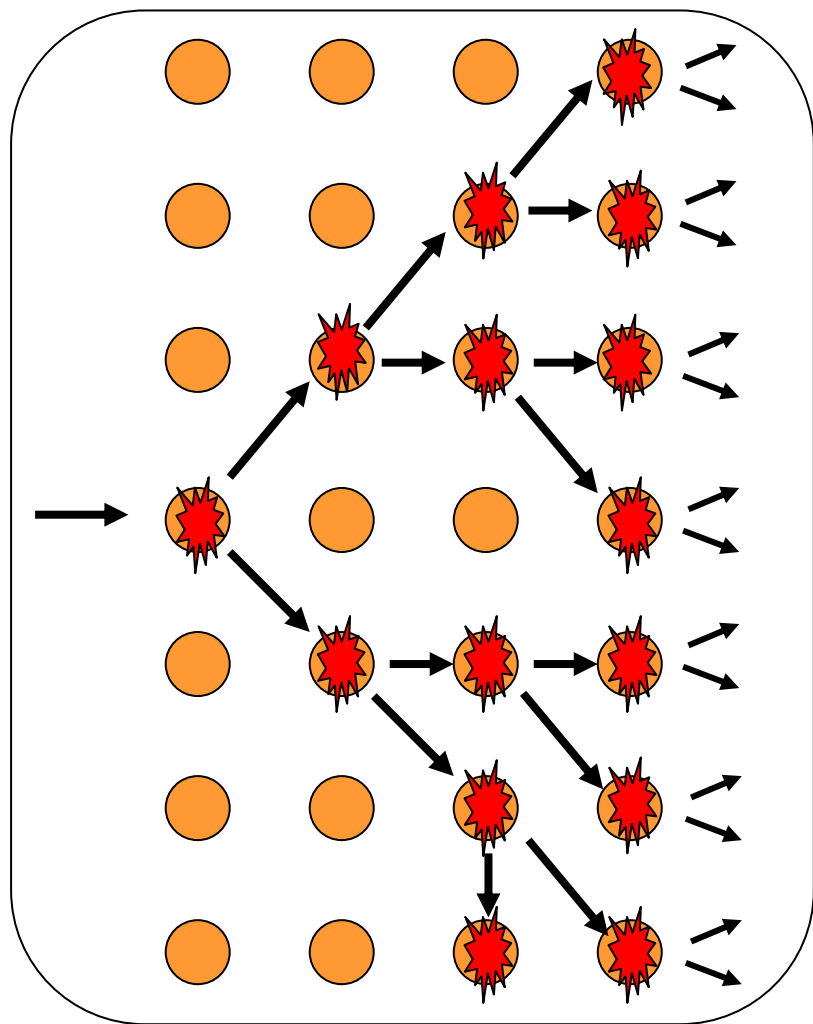
ウランの核分裂とプルトニウム239の生成



天然ウラン



核分裂の連鎖反応



● U235

● U238

→ 中性子



核分裂



Pu生成

1941年12月6日、真珠湾攻撃の前夜 米国は原爆開発推進を決定した



- 電磁法、遠心法、及び拡散法によるU235の生産(ウラン濃縮)
- ウランの連鎖反応炉によるプルトニウムの生産



原爆計画推進の中核となった4人の
米国科学者：ローレンス、コンプトン、
ブッシュ、コナント

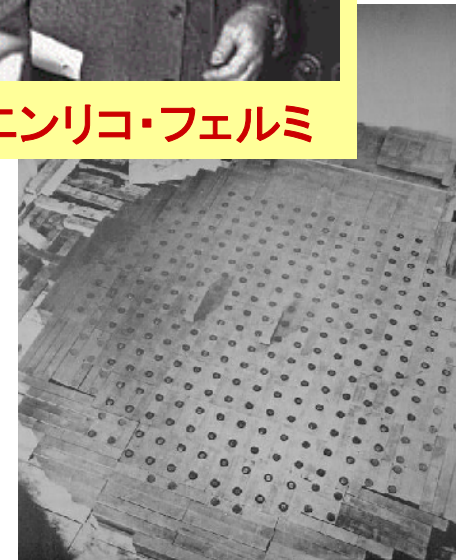
1942年12月2日、シカゴ大学の フットボール場観覧席の下で...



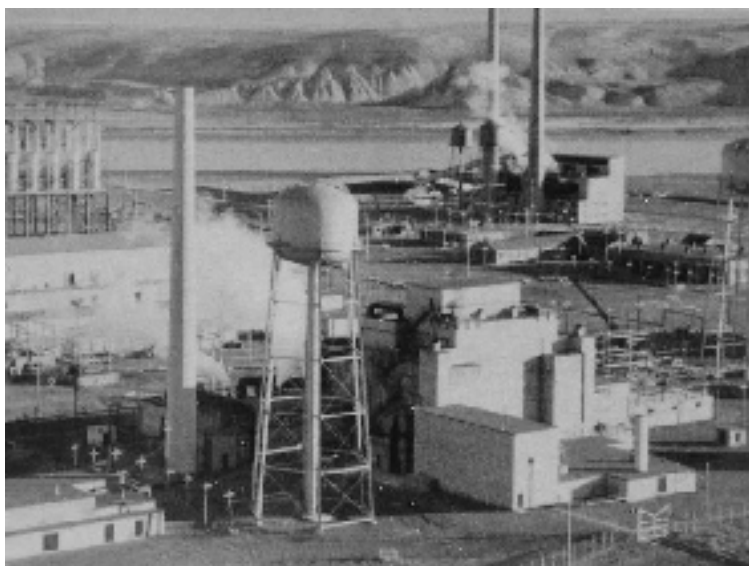
エンリコ・フェルミ

- フェルミらは人類最初の原子炉
CP-1の臨界達成に成功

燃料：天然ウラン金属、 減速材：黒鉛

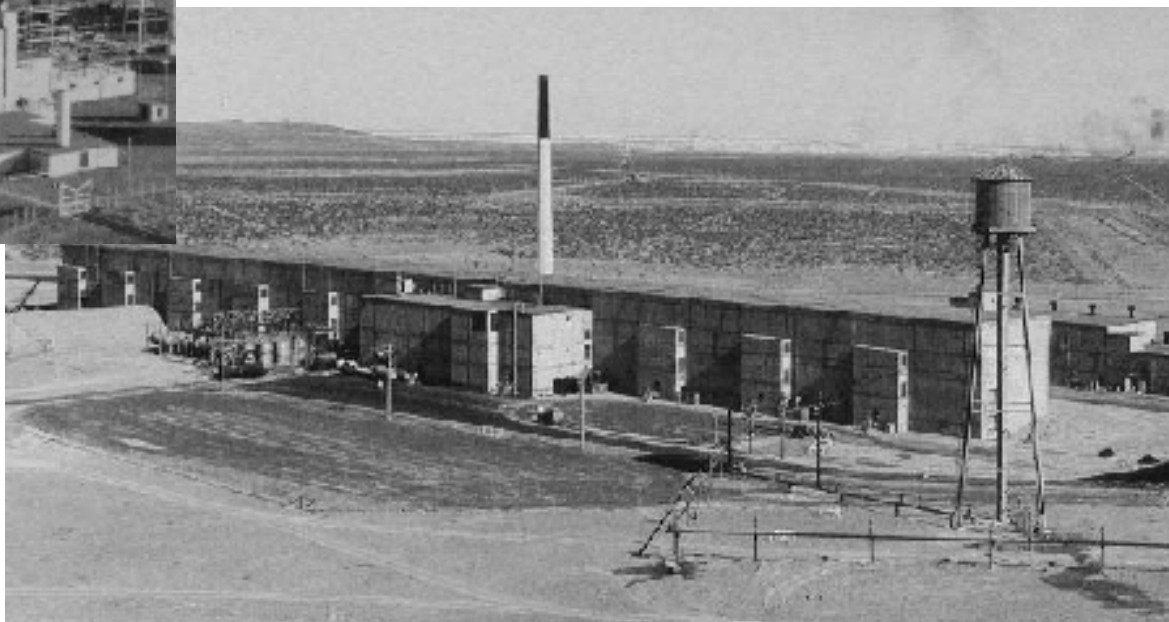


ワシントン州ハンフォードにPu生産炉と Pu 分離回収工場が建設された



Pu生産炉
1944年10月
運転開始

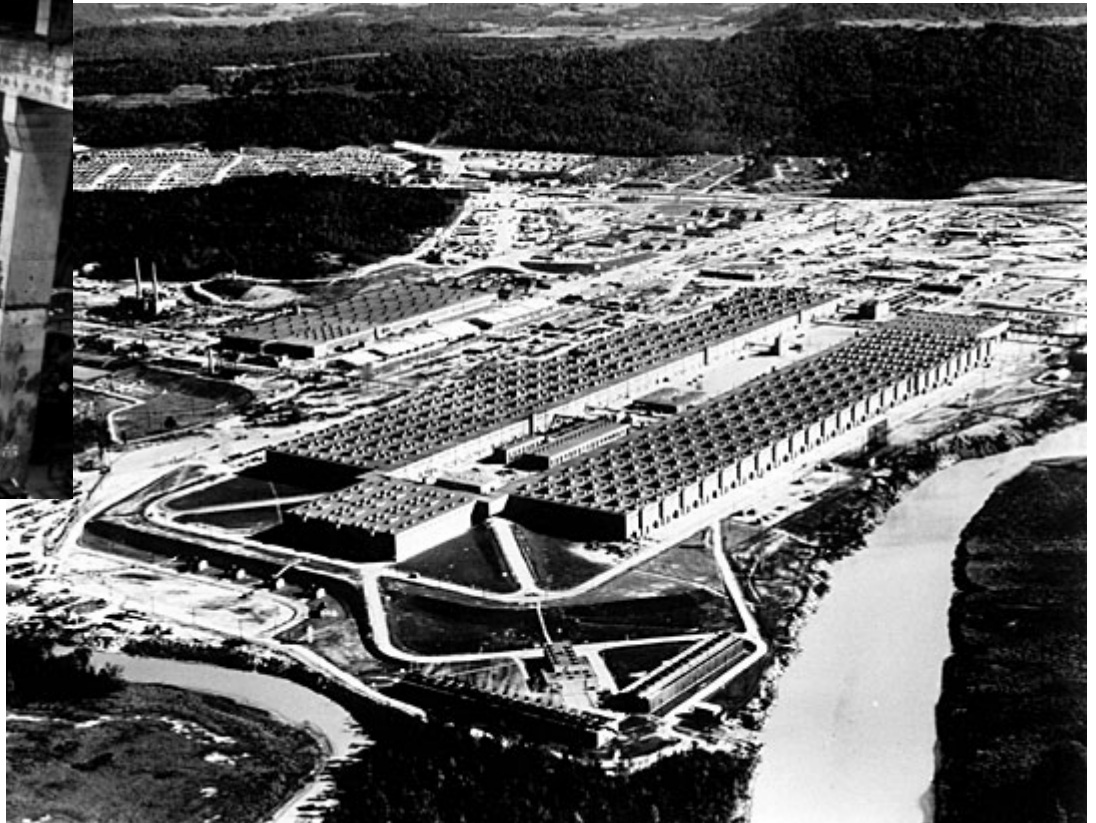
Pu分離回収工場
(リン酸ビスマス法)
1944年12月運転開始



テネシー州オークリッジに巨大な ウラン濃縮工場が建設された

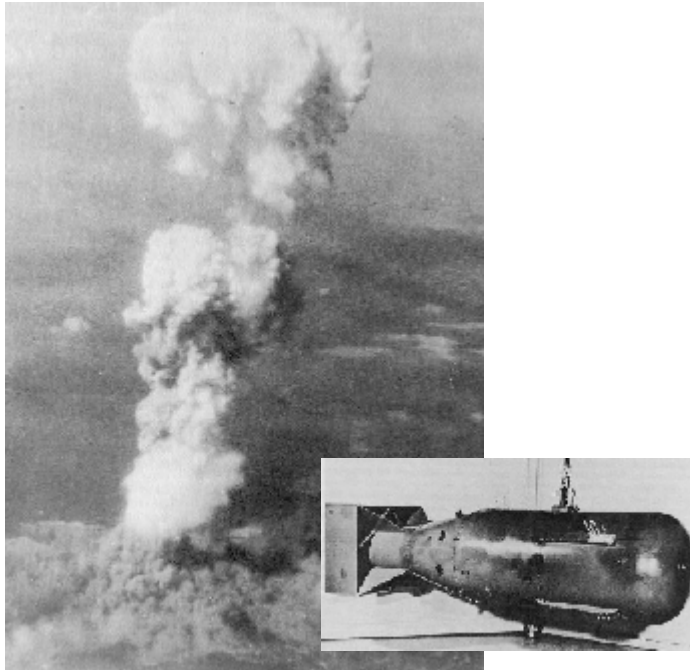


電磁法濃縮工場内部

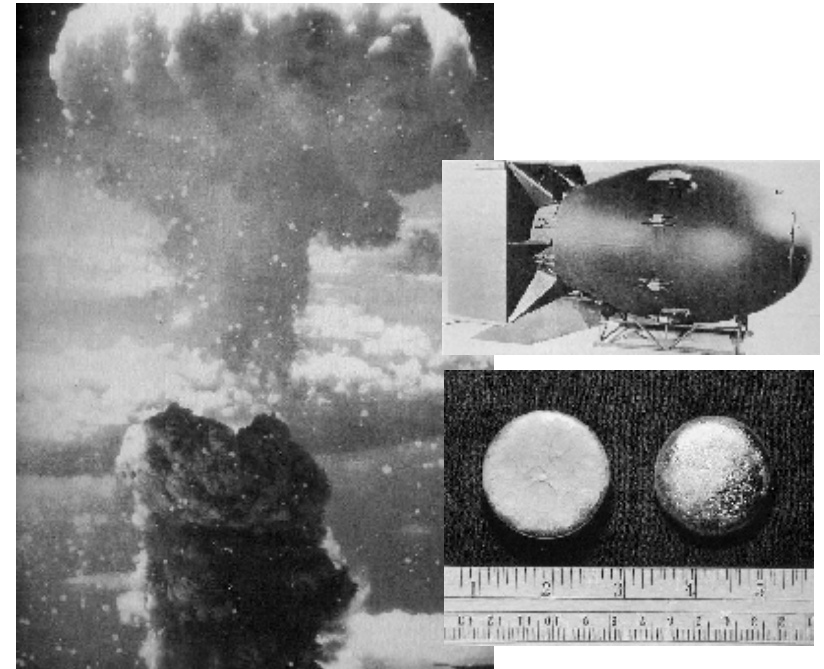


ガス拡散法濃縮工場

1945年8月6日広島に、 そして9日長崎に原爆投下



広島に投下された
原爆 リトルボーイ
(ウラン235使用)



長崎に投下された原爆
ファットマン と使用された
プルトニウム・ボタン

「アトムズ・フォー・ピース」演説と 第1回ジュネーブ会議



1953年12月 国連総会で
Atoms for Peace 演説を行う
アイゼンハワー大統領

1955年8月 ジュネーブ
原子力平和利用のための
国際会議



日本の原子力利用開発の開始

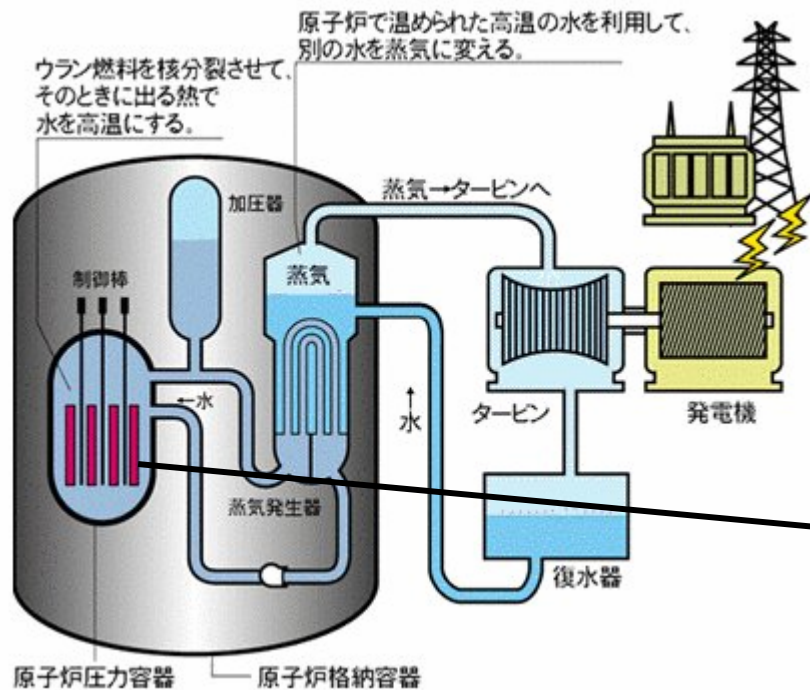
- 1954年3月：2億3千5百万円の原子力予算上程（中曽根議員）
- 1955年8月：中曽根議員ほか、第1回ジュネーブ会議参加
- 1955年12月：原子力基本法成立
 - 平和利用に限る
 - 民主・自主・公開の原則
- 1956年1月：原子力委員会発足
- 1956年6月：原研設立、8月：原燃公社設立

現代編

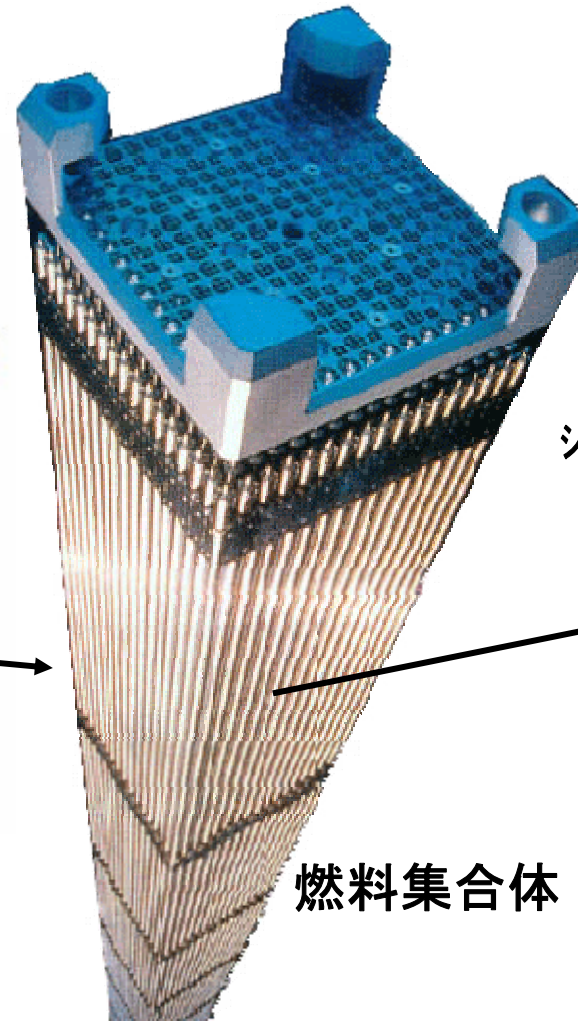
核燃料サイクルのオプションと
その意義

原子炉と核燃料

(加圧水型軽水炉 PWR の例)



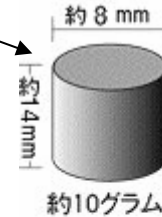
原子力発電所



燃料集合体

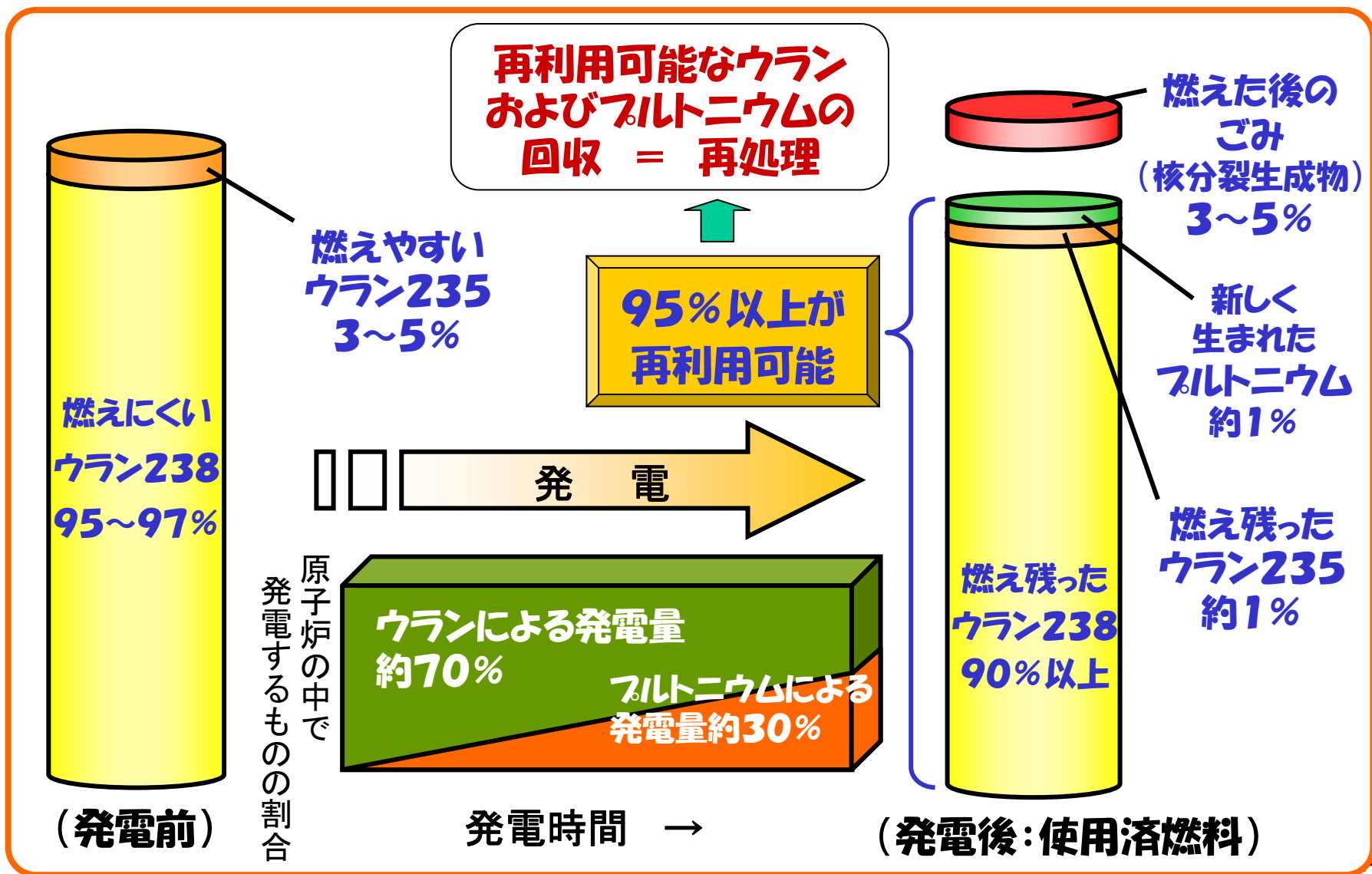
被覆管
ジルコニウム合金

燃料
ペレット
〔二酸化
ウラン〕

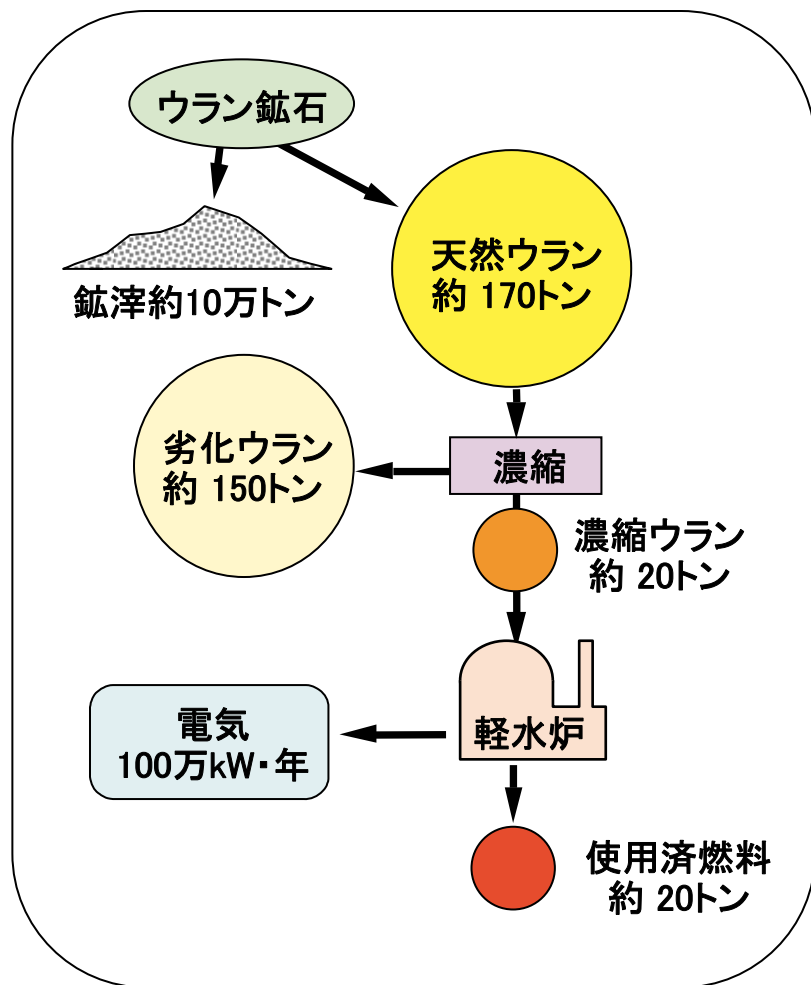


燃料棒

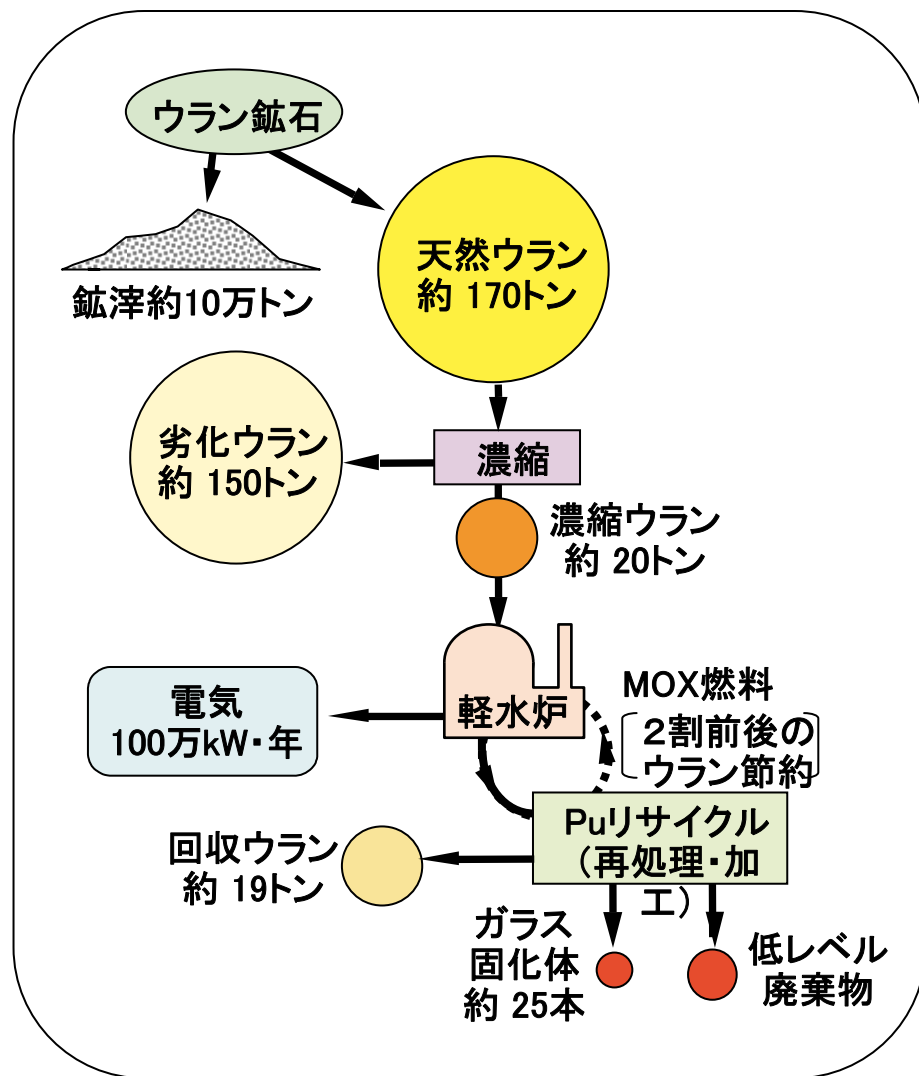
原子炉(軽水炉)の使用済燃料



軽水炉時代の核燃料サイクルの二つのオプション



直接処分
(使い捨て方式)



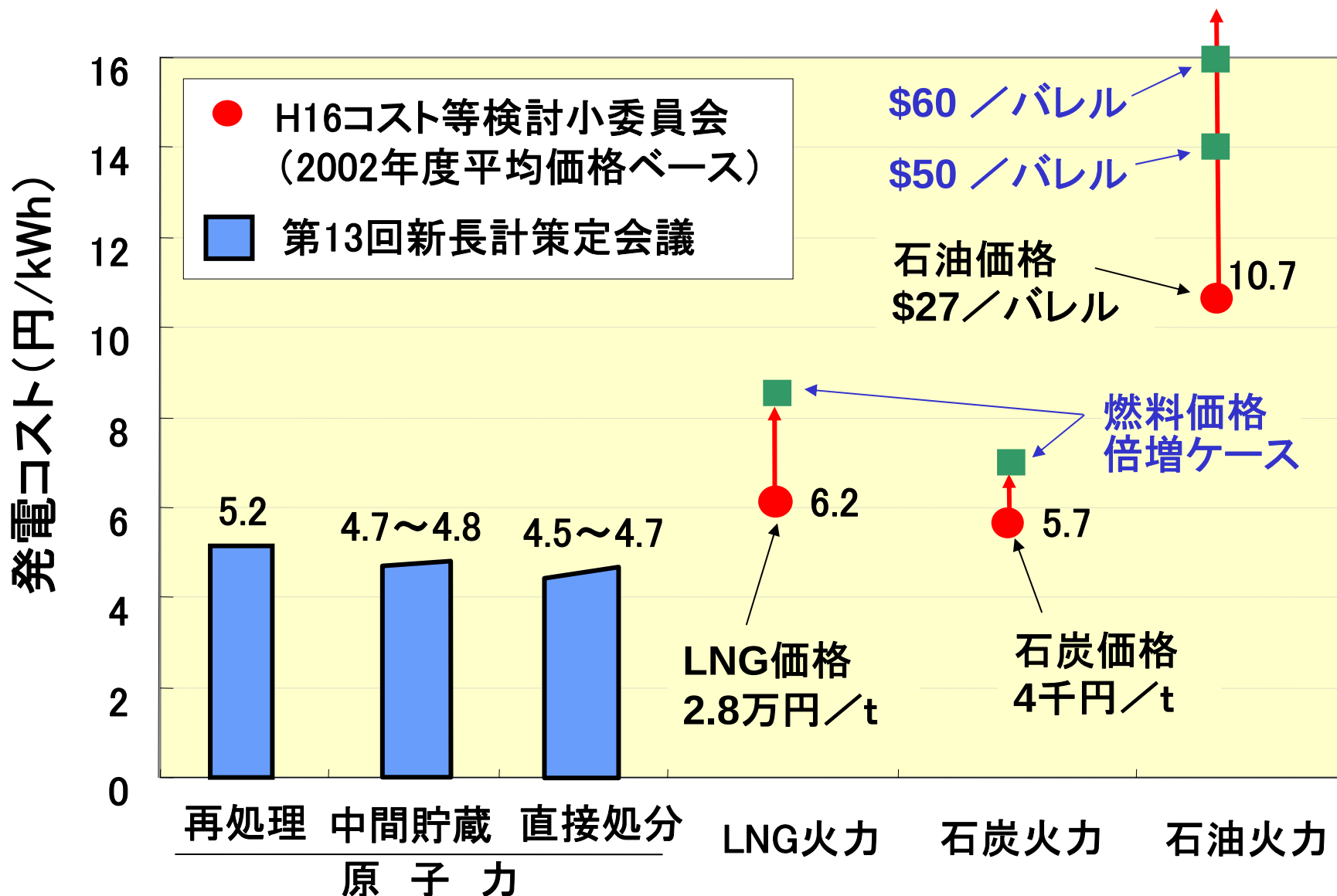
リサイクル方式(部分リサイクル)

直接処分か、リサイクルか？

- 六ヶ所の再処理事業推進に関し、経済性の観点や、核不拡散の観点などから、批判がいろいろなところから出た
- それらを踏まえ、「**原子力政策大綱**」(注)策定の過程で、両オプションの詳細な比較検討を実施
- その結果として、**リサイクル政策堅持を決定**
 - － 核燃料資源を合理的に達成できる限りにおいて有効に利用することを目指して、安全性、核不拡散性、環境適合性を確保するとともに、経済性にも留意しつつ、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム、ウラン等を有効利用することを基本方針とする

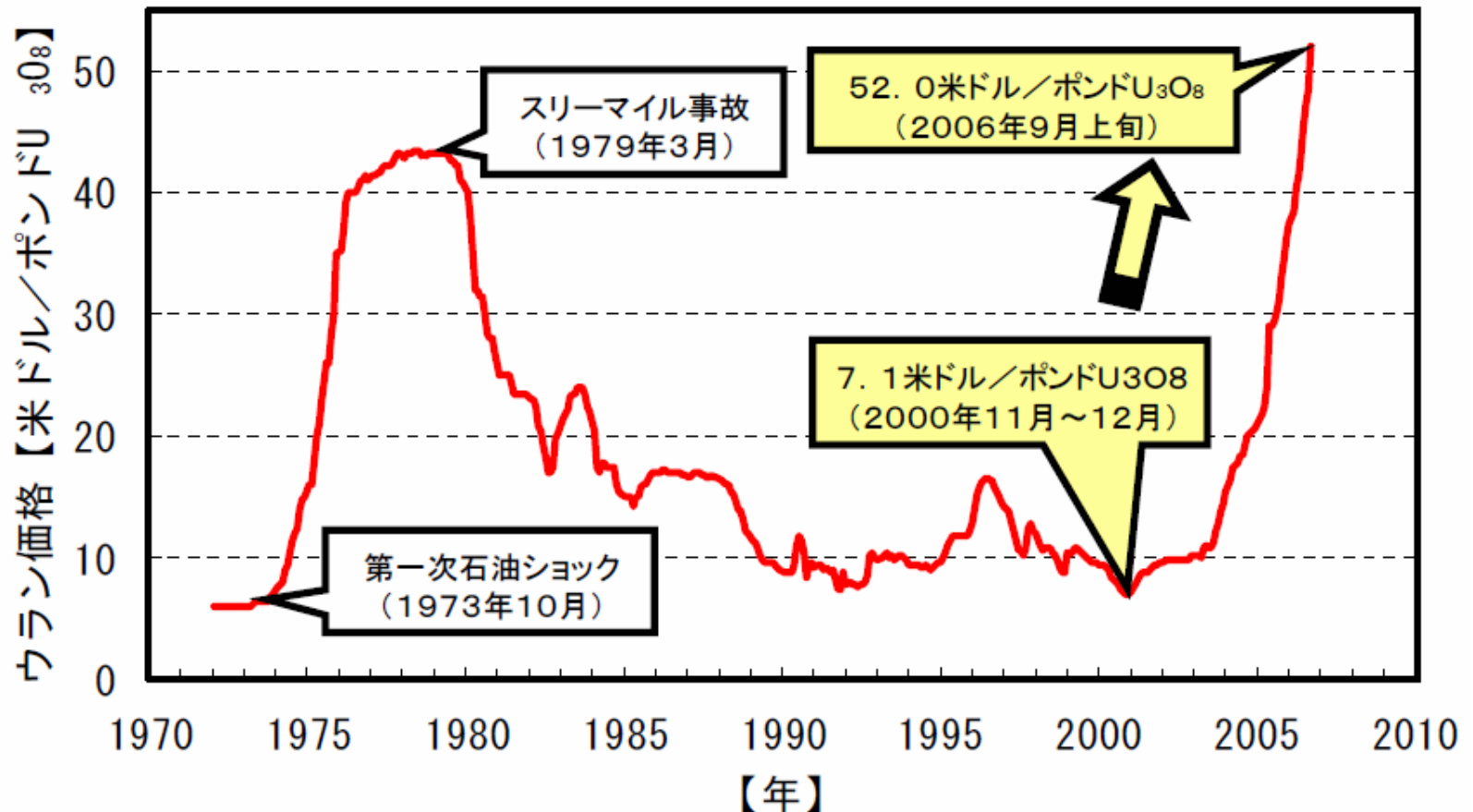
(注) 平成17年10月11日原子力委員会決定、平成17年10月14日閣議決定決定

発電コストの変動



ウラン価格の急騰

- 世界的な原子力エネルギー需要
- 中国の将来需要急増



昨年のIAEA総会における エルバラダイ事務局長挨拶

(2004年9月20日)



「日本が、先進的な核燃料
サイクルを進める国として
統合保障措置の適用を受
ける最初の国になったこと
をお知らせでき、大変喜ば
しい」

欧州におけるPu利用状況

セラフィールド
再処理工場
(THORP)

イギリス

セラフィールドMOX工場

MDF 8tMOX/y

SMP 120tMOX/y(試運転中)

ラアーグ
再処理工場
(UP2, UP3)

ベルギー

ドイツ

スウェーデン

● MOX装荷炉

● MOX認可取得炉

欧州における軽水炉燃料
累積再処理量

約 25,000 トン

軽水炉でのMOX 燃料利用

- MOX装荷炉 35 基

- 累積使用量 約 2,000 トン

デッセルMOX工場
38tMOX/y

メロックスMOX工場
145tHM/y

カダラッシュ
MOX工場
(商業生産停止)

フランス

スイス

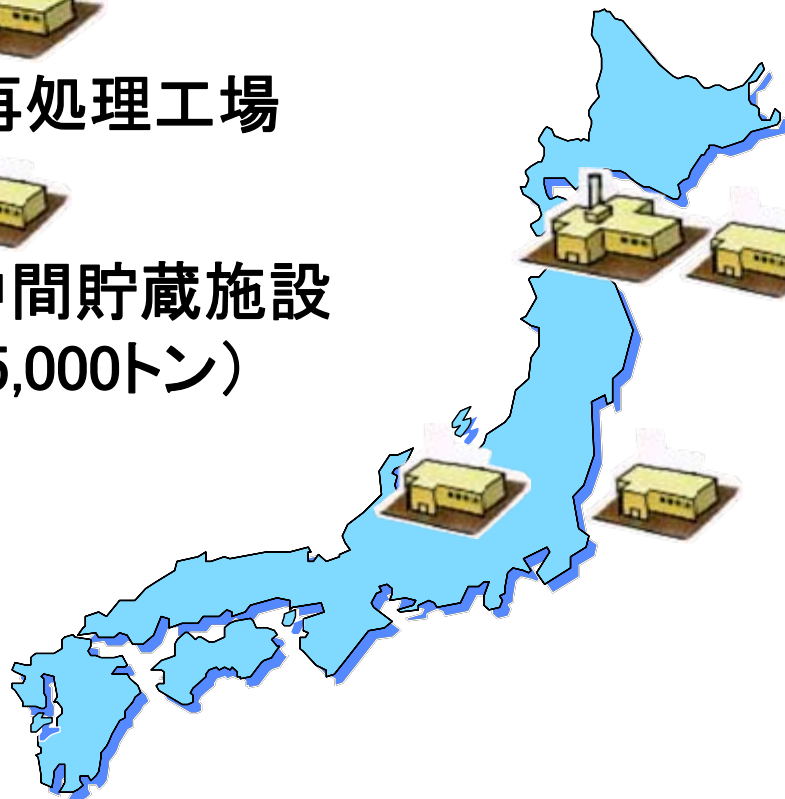
2050年までに必要な中間貯蔵施設



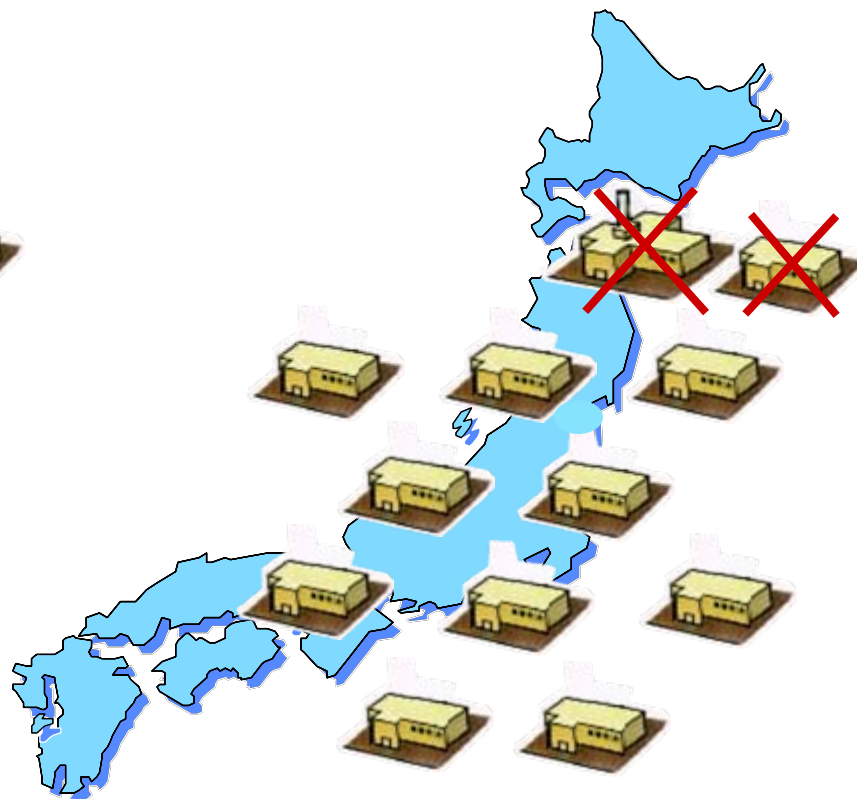
再処理工場



中間貯蔵施設
(5,000トン)

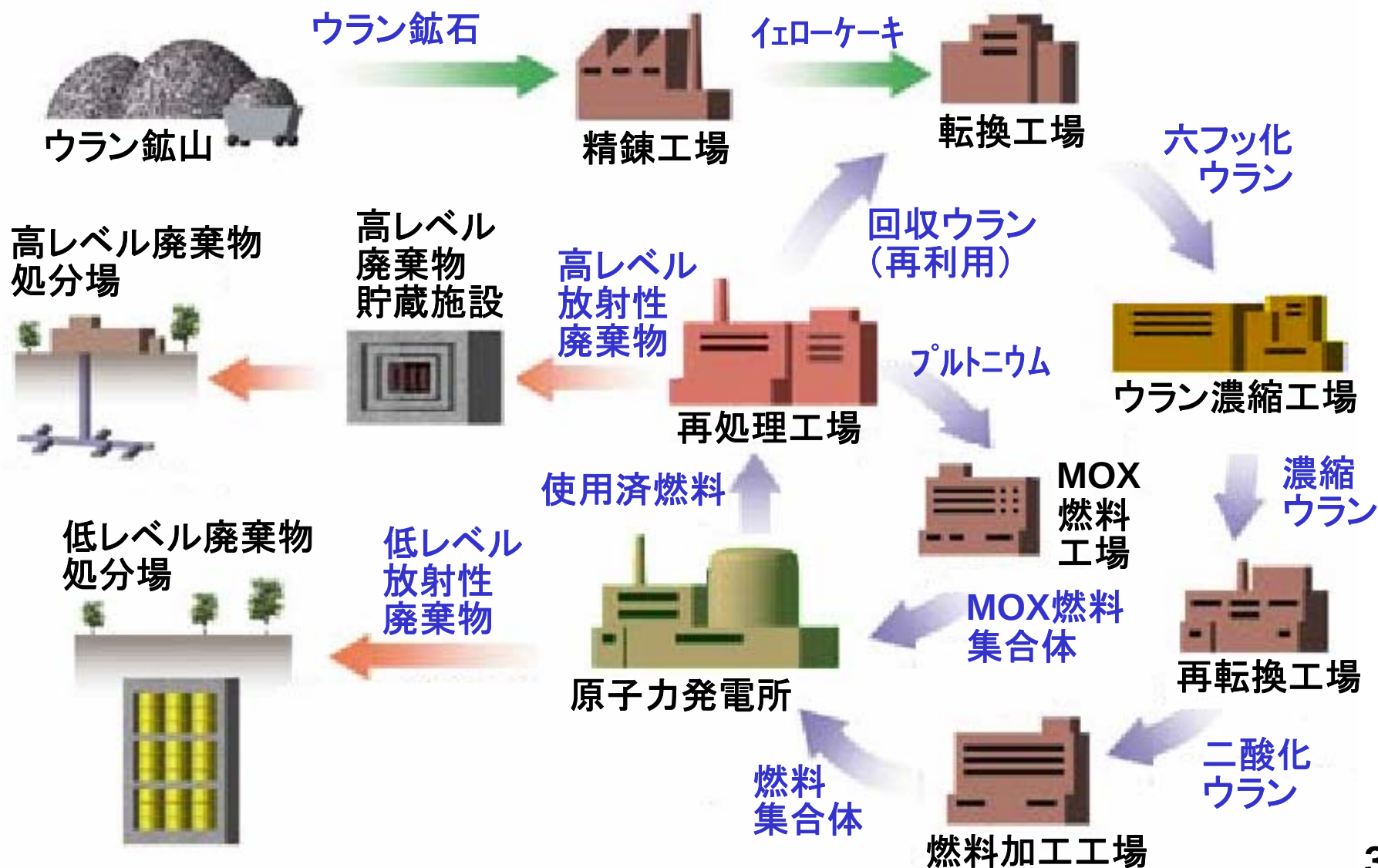


再処理実施ケース



再処理凍結ケース

軽水炉燃料サイクル

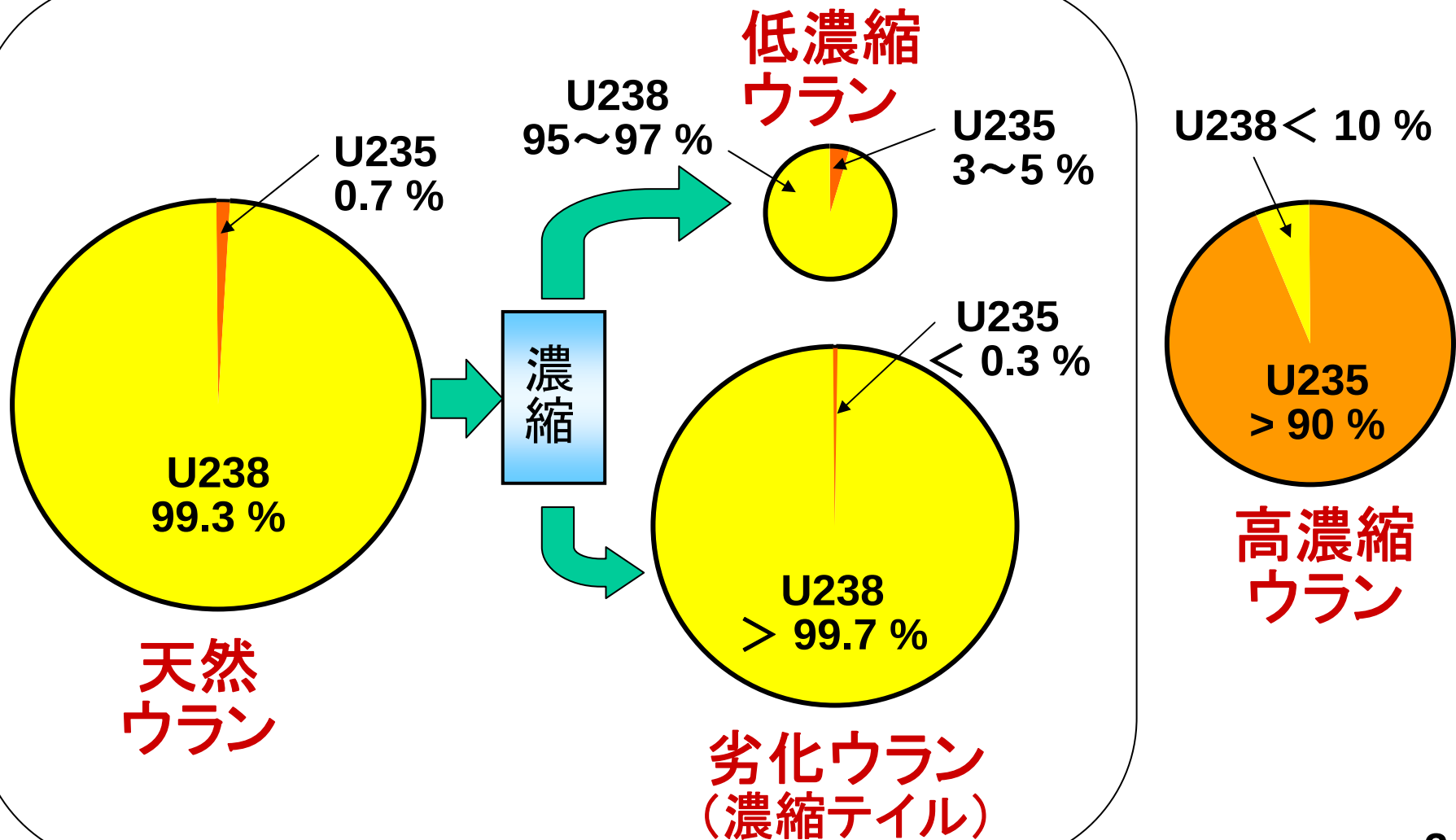


軽水炉燃料サイクルにおける 2つの枢要技術

	ウラン濃縮技術	再処理技術
戦時中 (米国)	電磁法及び ガス拡散法 (高濃縮ウラン製造)	燐酸ビスマス法 (沈殿法)
現在	遠心法 (低濃縮ウラン製造)	溶媒抽出法 (ピュレックス法)

- いずれも「機微技術」で厳格な保障措置適用

ウラン濃縮

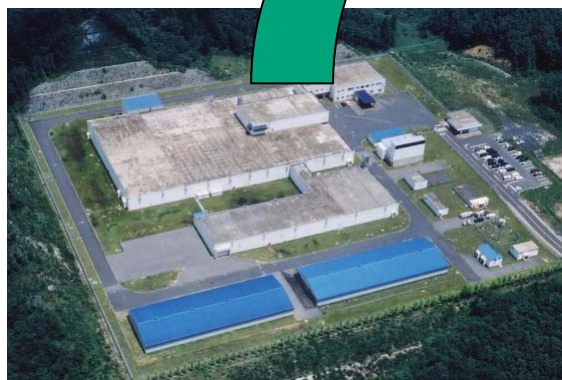


遠心法ウラン濃縮

- 旧動燃で遠心法濃縮技術開発
- 六ヶ所村に濃縮工場（日本原燃）
- さらに高性能の遠心機を開発中（日本原燃）



日本原燃
六ヶ所濃縮工場

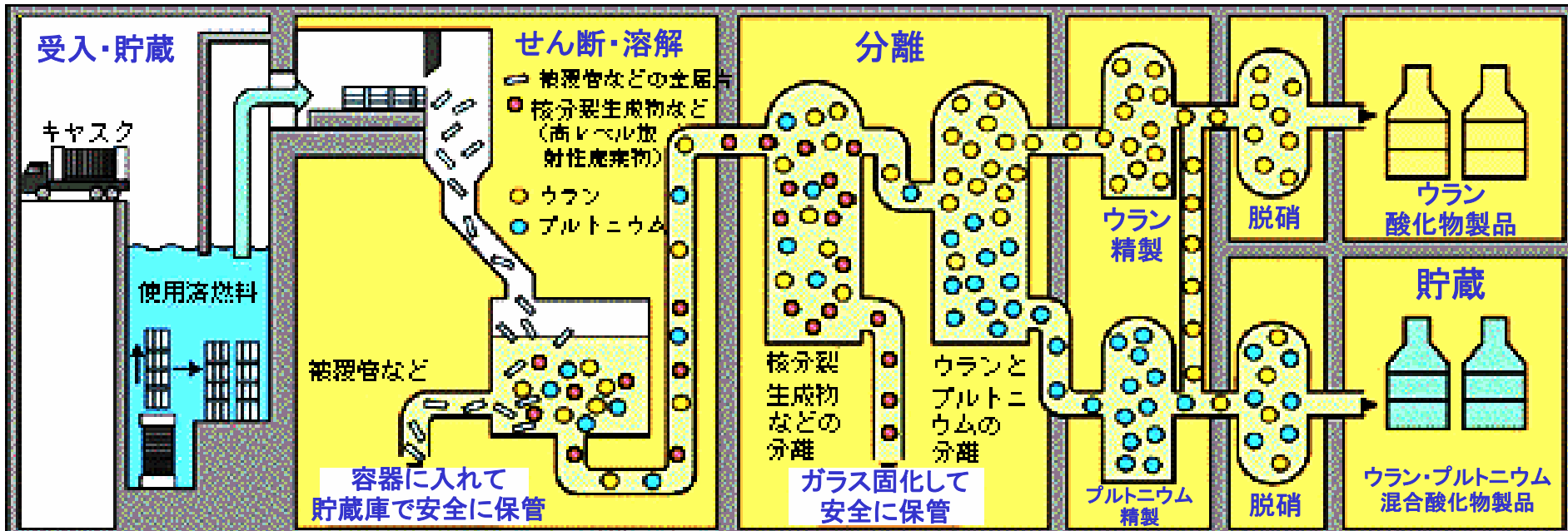


旧動燃 人形峠濃縮原型プラント



再処理

- 使用済燃料を硝酸で溶かし、化学分離により核分裂生成物を除去し、ウラン、プルトニウムを回収する工程



再処理

- 1977年から旧動燃(原子力機構)が東海再処理工場を運転、これまでに1,123トンの使用済燃料を処理
- 日本原燃の六ヶ所再処理工場(処理能力800トン／年)が試運転中、来年本格運転開始の予定



東海再処理工場



六ヶ所再処理工場

再処理で回収されるPuはMOX燃料として再利用(プルサーマル計画)

- 原子力機構では約170トンのMOX燃料製造の実績
- 旧動燃の「ふげん」では、733体のMOX燃料集合体を燃やした(水冷却炉では世界一の実績)
- 日本原燃が六ヶ所にMOX燃料工場建設の準備中(国の安全審査中)



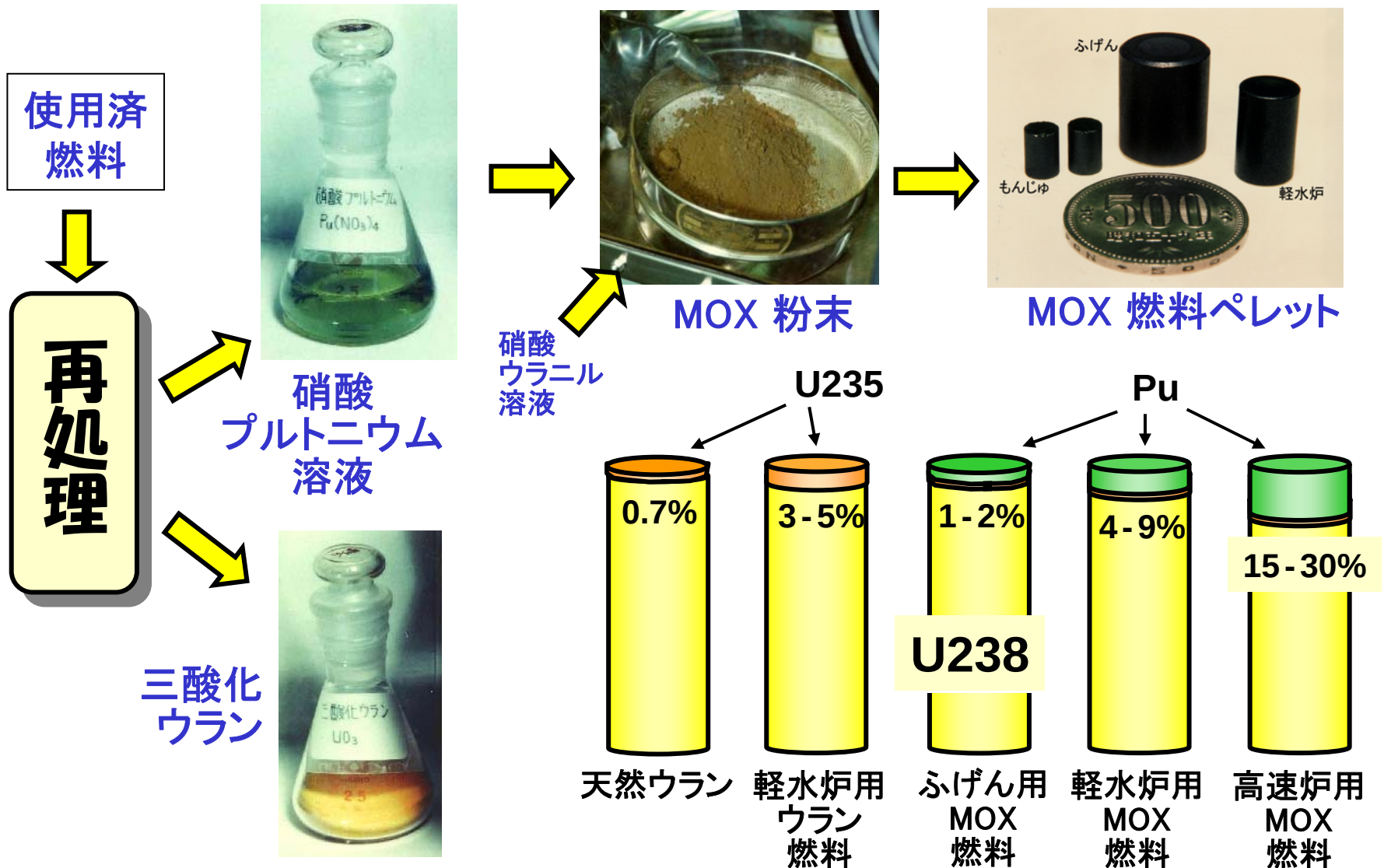
原子力機構東海のMOX燃料施設



六ヶ所MOX燃料工場完成予想図

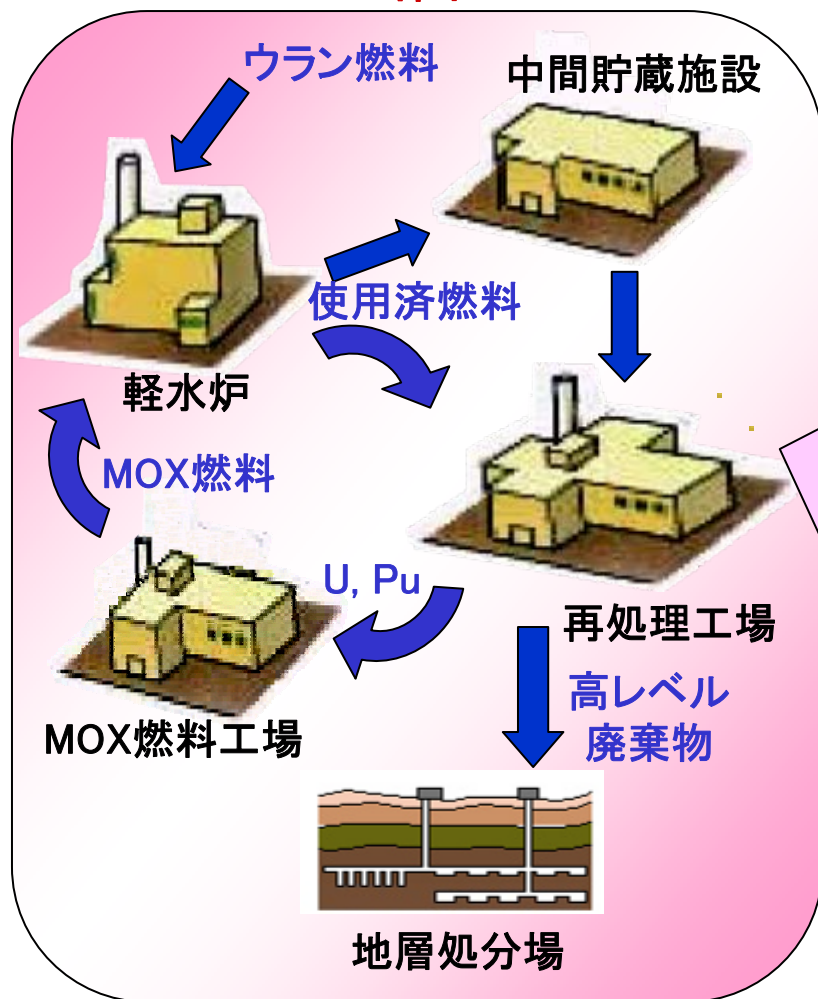
プルトニウムの姿とMOX燃料

(MOX = ウラン・プルトニウム混合酸化物)



まずは軽水炉でのプルサーマル利用(部分リサイクル) 将来は高速増殖炉での完全リサイクル

当面

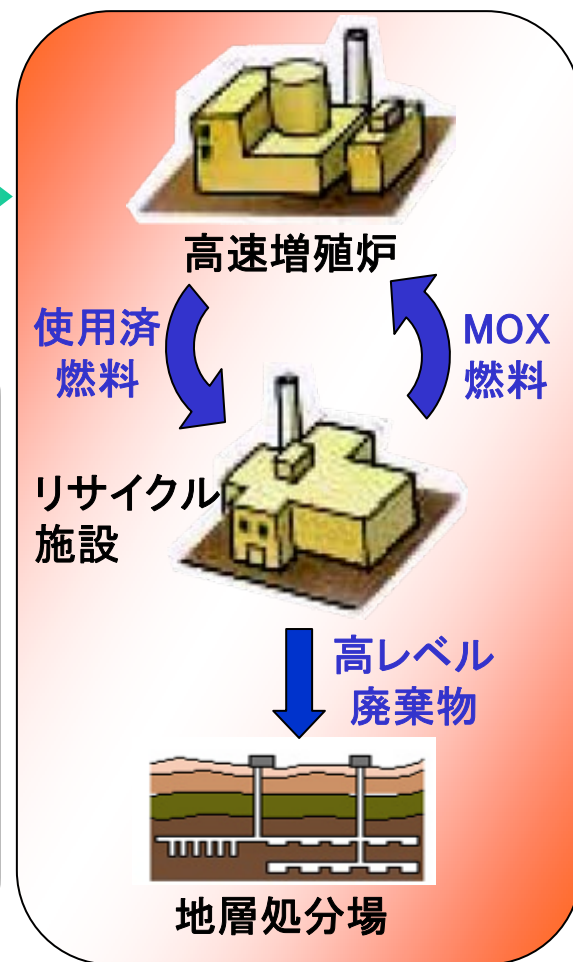


U, Pu の部分リサイクル

研究開発

- ◆使用済燃料の過大蓄積回避
- ◆ウラン資源節約
- ◆再処理・Pu取り扱い技術の習熟
- ◆ガラス固化体での地層処分事業の推進
- ◆Pu利用に関する国際的、社会的インフラ整備

将来



U, Pu, MA の完全リサイクル

高レベル放射性廃棄物の処分

・ガラスに固めて、地下の安定な岩盤に埋設処分(地層処分)



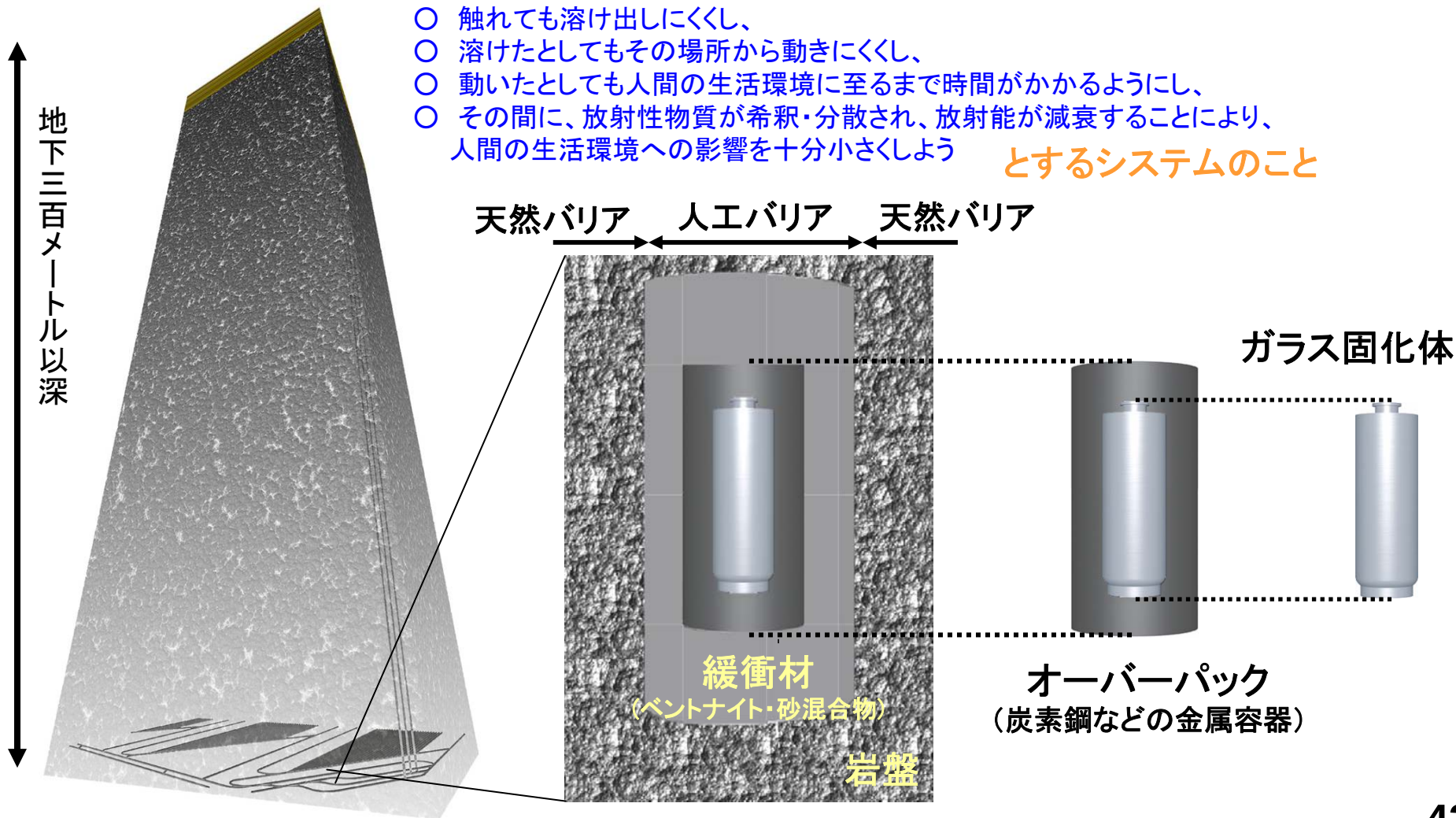
わが国の地層処分の概念(多重バリアシステム)

多重バリアシステムとは、

地下深くの安定した地層(天然バリア)に、複数の人工障壁(人工バリア)を組み合わせることにより、

- 地下水を放射性廃棄物に触れにくくし、
- 触れても溶け出しにくくし、
- 溶けたとしてもその場所から動きにくくし、
- 動いたとしても人間の生活環境に至るまで時間がかかるようにし、
- その間に、放射性物質が希釈・分散され、放射能が減衰することにより、人間の生活環境への影響を十分小さくしよう

とするシステムのこと

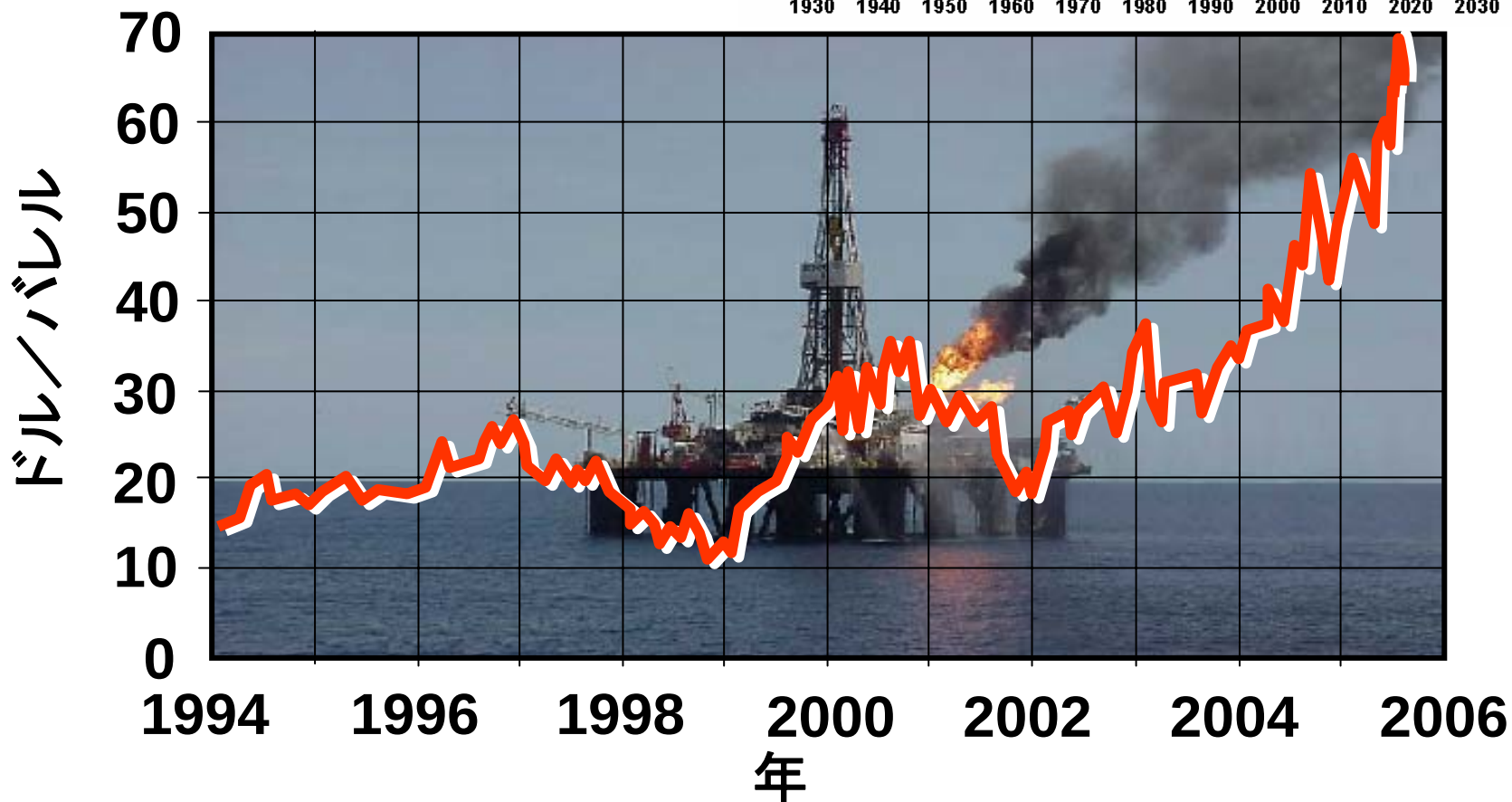
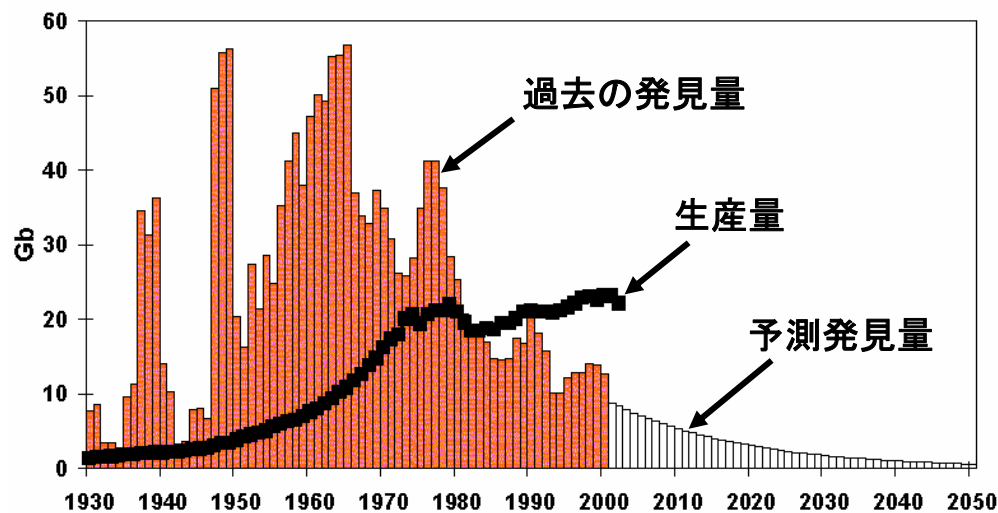


将来編

高速増殖炉による完全リサイクル実現に向けて

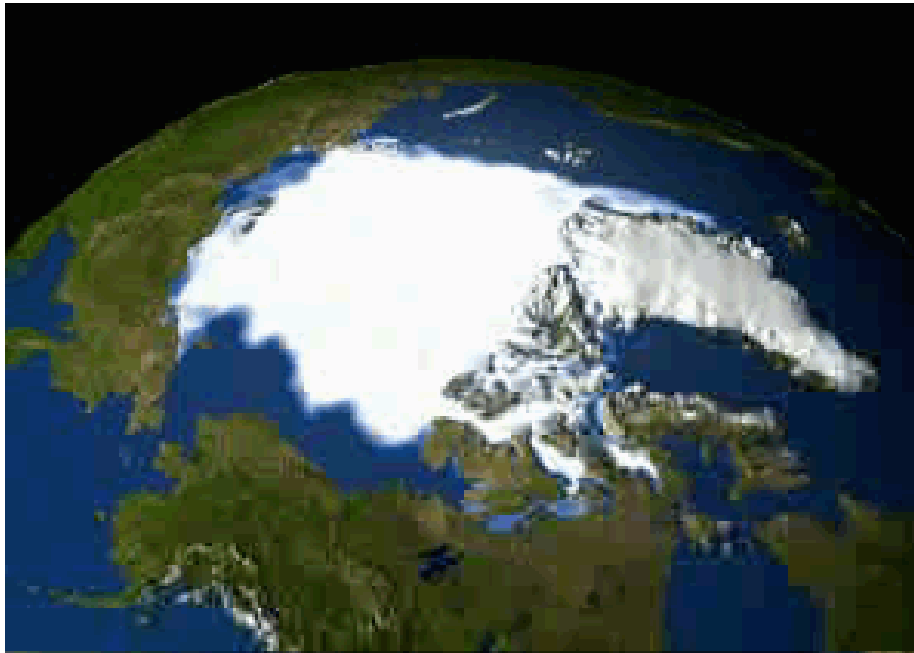
原油価格の急騰

- 石油低価格時代の終焉 -



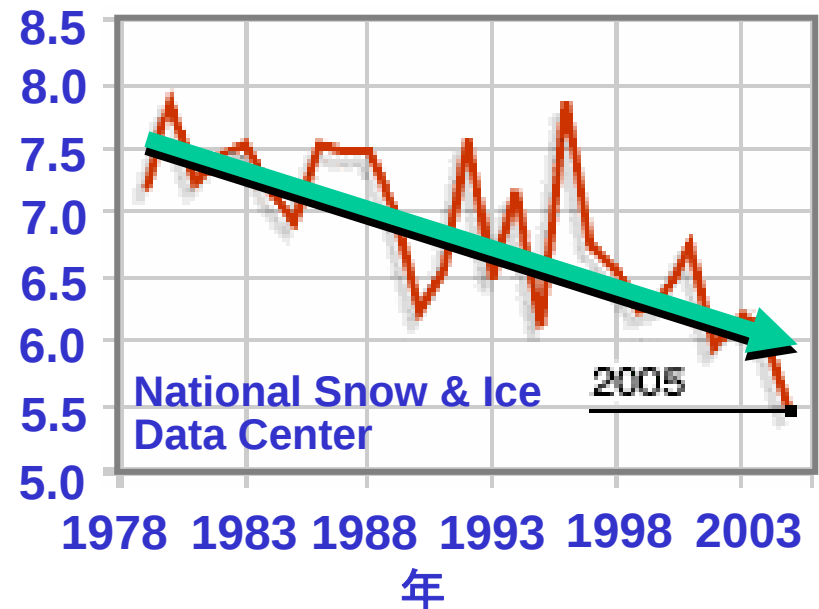
北極の氷が融けている！

- 2005年夏は北極の氷の面積が史上最小
- 夏季の北極の氷の面積：10年で8%ずつ減少
- このまま進むと 2060 年の夏には北極にまったく氷がなくなってしまう

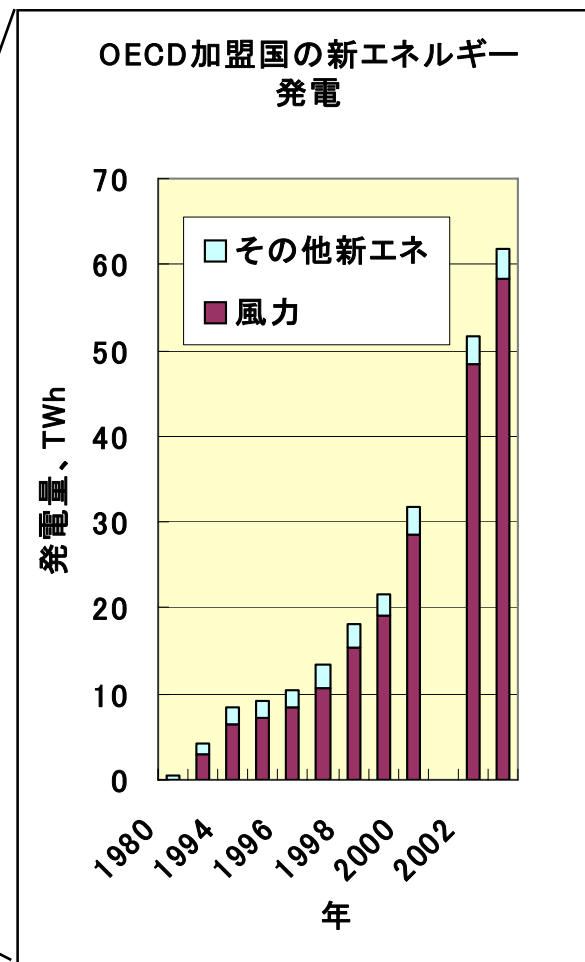
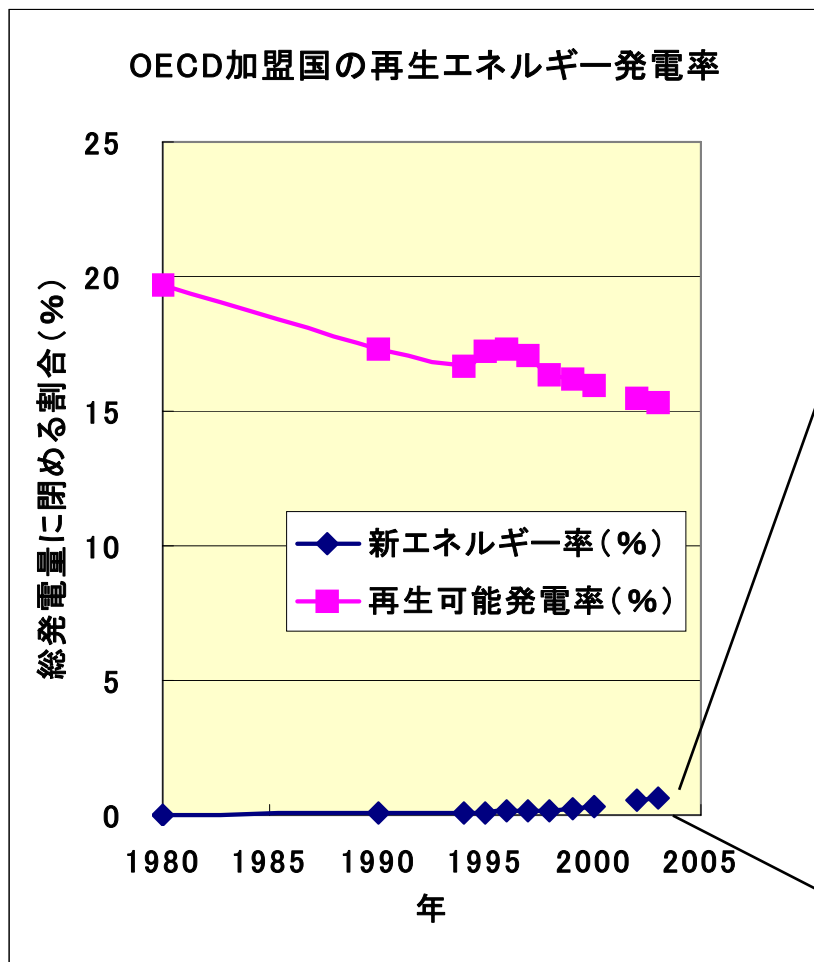


NASA

氷の面積 (百万 km²)

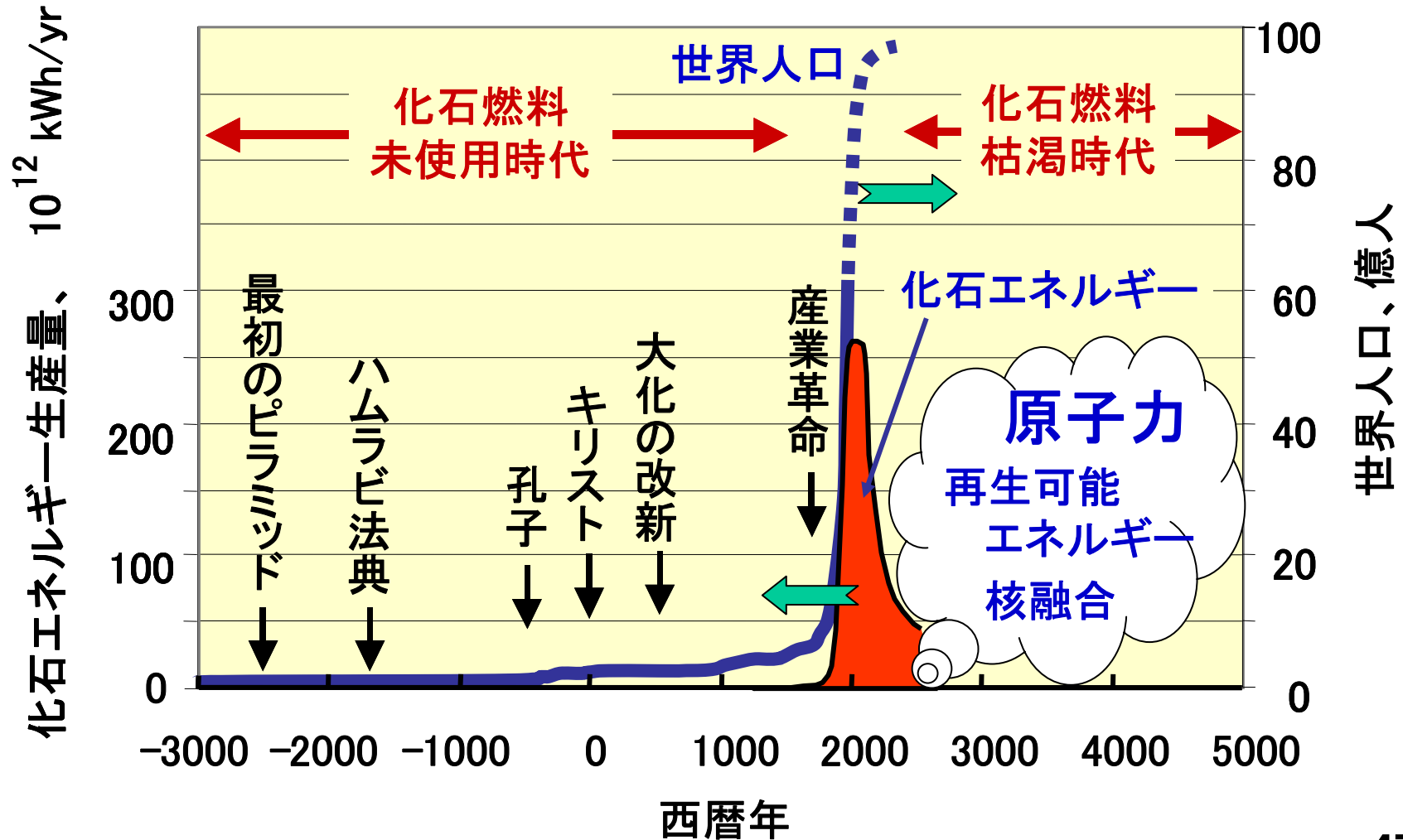


OECD加盟国における再生可能エネルギー発電率



原子力の究極の使命

- 半恒久的な基幹エネルギー供給



環境保護者からも 原子力支持の声

原子力発電は温暖化防止の切り札としても期待されている。環境保護団体「グリーンピース」の創設者の一人で、著名な環境保護論者であるパトリック・ムーア博士に聞いた。

「環境保護の観点から原子力をどう評価するか。」

「原子力は温室効果ガスをまったく排出せず、化石燃料に取って代わる唯一のエネルギー源だ。スリーマイルやチェルノブイリのことが無い、現在では安全性は確立されており、完全に制御可能だ。ガイア理論を立ち立てたジェームズ・ラフロック博士も『原子力こそが温暖化という人類の危機に対処できる』と語っている。現在、アメリカやカナダをはじめ、フィンランド、スウェーデンなどのヨ

グリーンピース 創設者の一人 パトリック・ムーア博士



原子力は安全性確立

「ロップ諸国も原子力を再評価しており、非常に心強く思っている。」

「グリーンピースは原子力に反対している。」

「彼らは原子力も火力も、水力でさえダムを造るから駄目だと反対している。これでは電力の99%を否定すること

になる。非論理的であることは明らかだ。では何を選択すべきか。建設的に検討した結果、放射性廃棄物の管理が完全に可能になっており、温暖化防止の切り札である原子力こそ有効だとの結論に達した。」

「環境保護論者の中には強い拒否反応がある。『科学的根拠によらず、一神宗教的な信念から反対している人が多い。対立者の論を認めず、どんな場所でも相手を攻撃する。私がグリーンピースから離れたのは、こうしたやり方に疑問を持ったからだ。』

カナダ出身。プリティッシュ・コロンビア大学在学中に「グリーンピース」を結成、核実験反対運動や捕鯨反対運動に身を投じた。現在も環境コンサルティング会社「グリーンスピリット・ストラテジーズ」の会長として、持続可能な環境保護を訴えている。生態学博士。

「モンテリオールでの京都議定書締結国会議の結果をどう評価するか。」

「アメリカを枠内にとどまらせたのは一歩前進だった。しかし、一部の反対で原子力の効用を明文化できなかったのは残念だった。排出量取引など京都メカニズムがあるからこそ議定書は維持されている。だが、本質的に議定書は経済抑制的だ。実はこれは誤った方法だ。原子力などの技術革新的なアプローチでCO₂削減を目指す方がより効果的で、途上国の参加も得られやすい。ただ、アメリカは民主党も議定書に反対しているため、次の大統領にバラクリントンがなっても復帰は難しい。中国やインドもどんな状況下でも議定書の枠外にいたいと願うだろう。」

「日本は核燃料サイクル政策を取っている。」

「使用済み燃料の95%を燃料として使えるものがあり、これを活用するのは保護にとっても極めて有利だ。」

「唯一の被爆国である日本は、原子力の怖さを知っている。」

「日本の方々の思いは理解している。しかし、な文明の利器も善悪両方ある。大切なのはそれを管理するかだ。原子力では完全に制御可能な持して確立されている。今も化石燃料を使い続けられ地球温暖化はますます進んでいく。かげがえのない地獄を守るため、原子力が有効であることを理解したいと願うだろう。」

大規模原子力発電国はクローズドサイクルを目指す

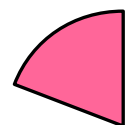
国	原発 基数	設備容量 (GWe)	現行政策	将来オプション
米国	103	97.5	直接処分からリサイクル政策に復帰	長期的には高速炉での完全リサイクル(AFCI, GNEP)
フランス	59	63.1	リサイクル政策	高速炉での完全リサイクル
日本	52	45.7	リサイクル政策	高速炉での完全リサイクル
ドイツ	19	22.3	原子力からの撤退	—
ロシア	30	22.2	リサイクル政策	高速炉での完全リサイクル
韓国	19	15.9 26.1 (2015年)	態度未決 (当面直接処分)	DUPICリサイクル あるいは高速炉リサイクル
中国	9	7.0 40 (2020年)	リサイクル政策	完全リサイクル (高速実験炉建設中)
インド	14	2.72 20.9 (2020年)	リサイクル政策	高速炉でのU/Puリサイクル (高速原型炉建設中) 重水炉でのThリサイクル

現在 20 GWe を超えている国

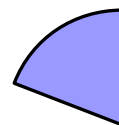
2020年までに 20 GWe を超えると予想される国

(注) 原発基数、および設備容量は
2004年5月時点の数値

発電容量でみた2つのオプション

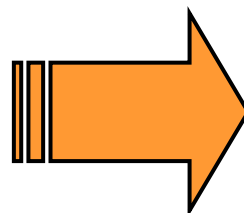
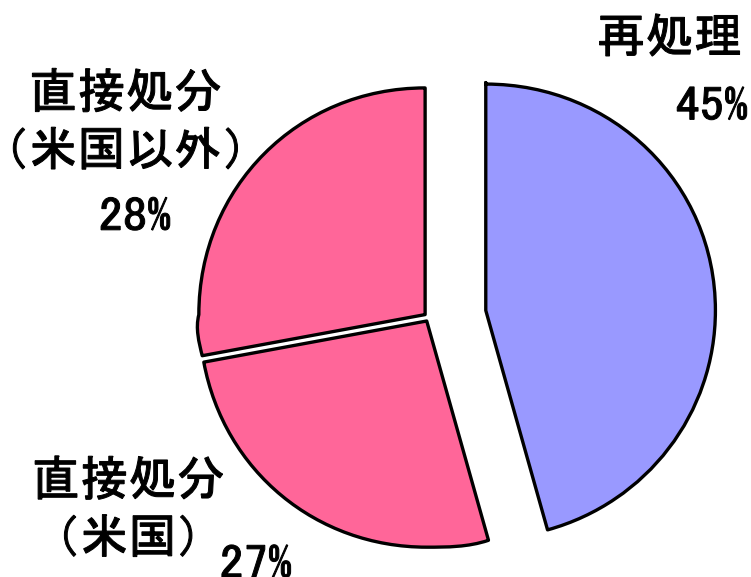


直接処分

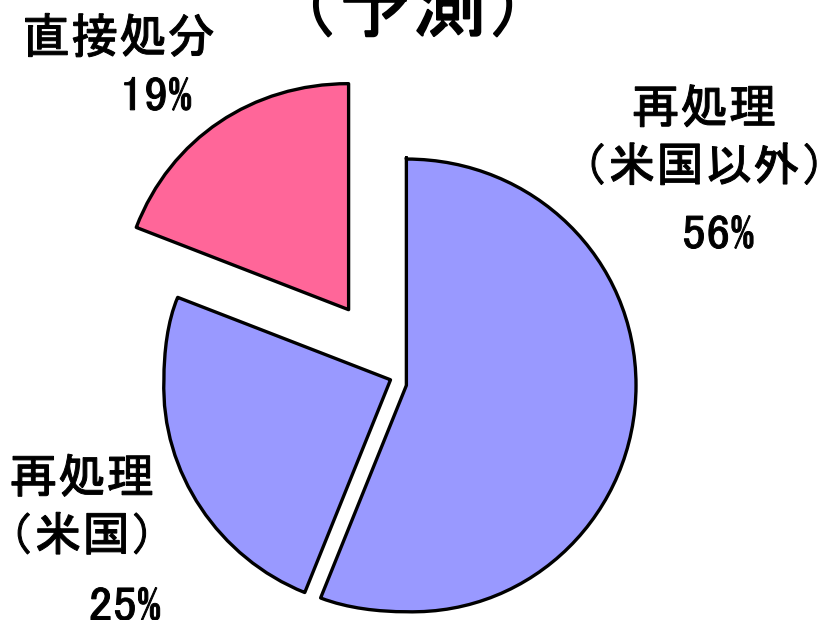


再処理

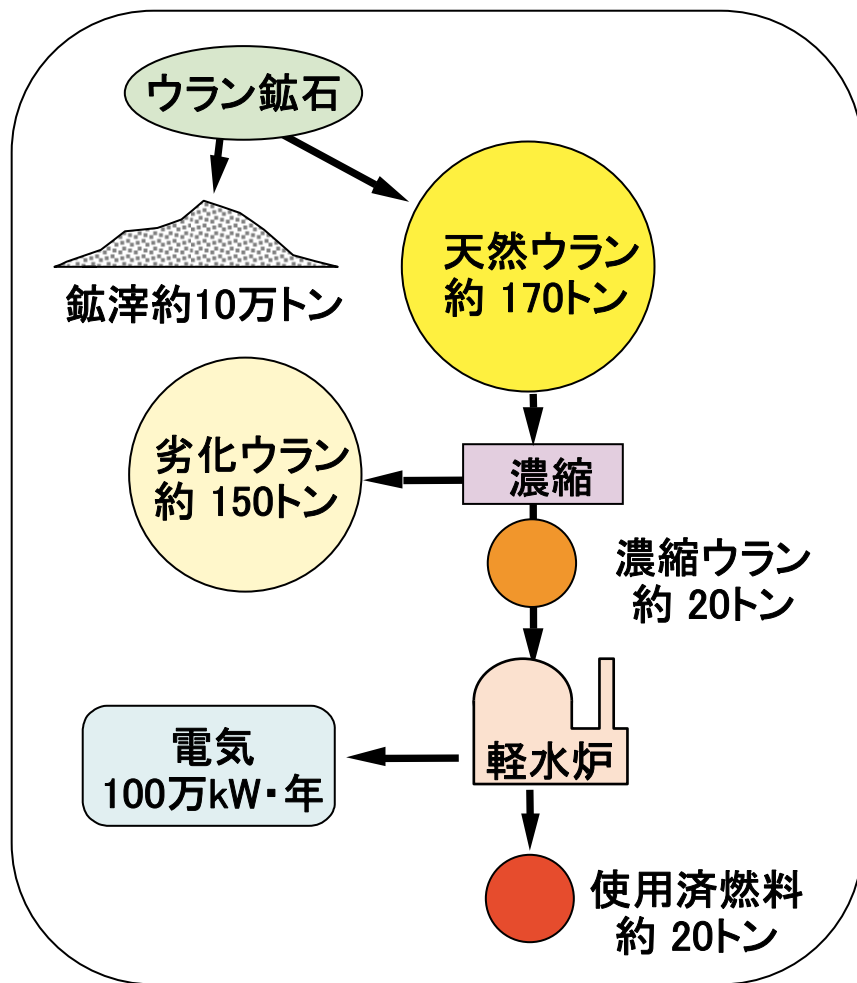
2004年



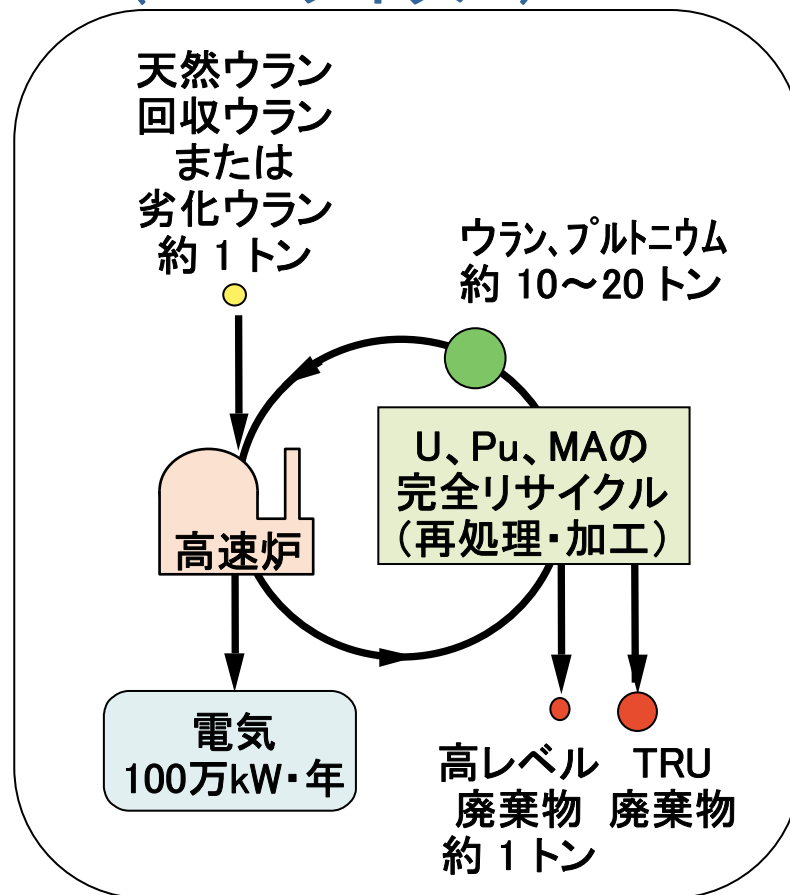
2020年
(予測)



究極のリサイクル: 高速増殖炉サイクル (FBRサイクル)



軽水炉・直接処分
(ウラン使い捨て方式)

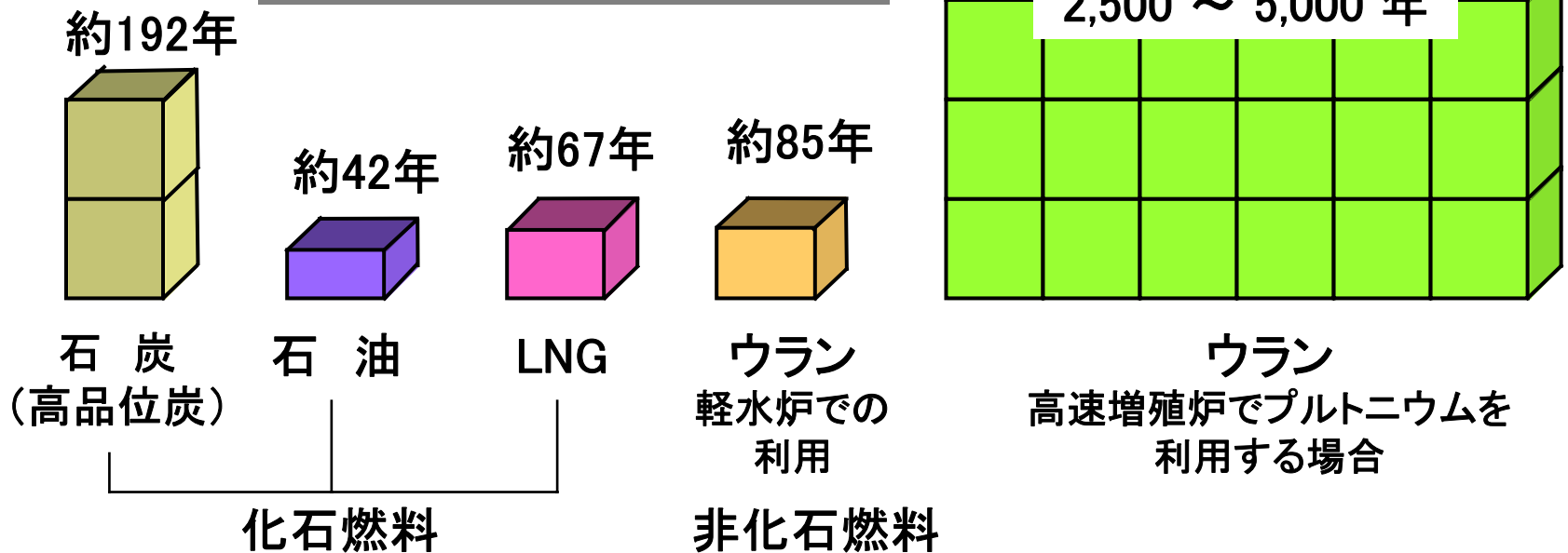


高速増殖炉サイクル
(完全リサイクル方式)

- ・ ウラン採掘は当分不要になる
- ・ 濃縮も不要になる

エネルギー資源としての プルトニウム

・使用済み燃料を再処理し、
高速増殖炉でプルトニウム
を利用する場合、ウランの
エネルギー資源としての価
値は数十倍になる



世界のエネルギー資源可採年数

「Uranium 2003: Resources, Production and Demand」より

主要国では高速炉開発が再活性化!!

- **米国**も今年2月に高速炉開発再開を決めた(GNEPの一環, ただし「先進燃焼炉」との表現を用いている)
- **フランス**は2020年までに第4世代炉の原型炉(すなわち高速炉)を建設することを表明
- **ロシア**もBN600(60万kWの高速炉の発電所)を順調に運転しつつ、資金不足で長らく建設中断していたBN800の建設を再開
- **インド**は50万kWの高速原型炉を建設中で2020年までにさらに4基の実用炉導入を計画
- **中国**は2008年に高速実験炉が完成予定、2020年完成を目指し高速原型炉設計中
- **韓国**も高速炉の設計研究を推進中
- **わが国**では、「もんじゅ」の改造工事が進んでいるほか、高速増殖炉サイクル技術は、国の第3期科学技術基本計画において国家基幹技術の一つに位置づけられ、研究開発体制が強化されつつある

高速増殖炉(FBR)サイクルの実用化に向けた研究開発の展開

**FBRサイクル
実用化戦略調査研究
(H17年度まで)**

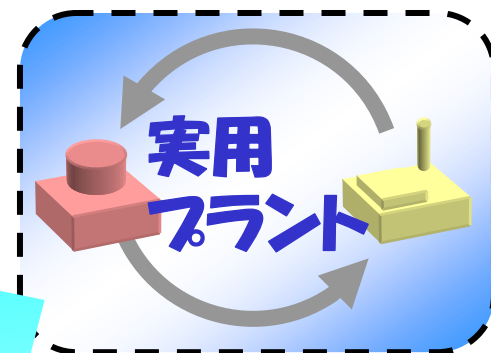
＜安全性＞

＜軽水炉に比肩する経済性＞

＜資源有効利用＞

＜環境負荷低減＞

＜核拡散抵抗性＞



工学規模での実証



基礎研究 段階



2015年頃までに競争力のある
FBRサイクルの技術体系を整備

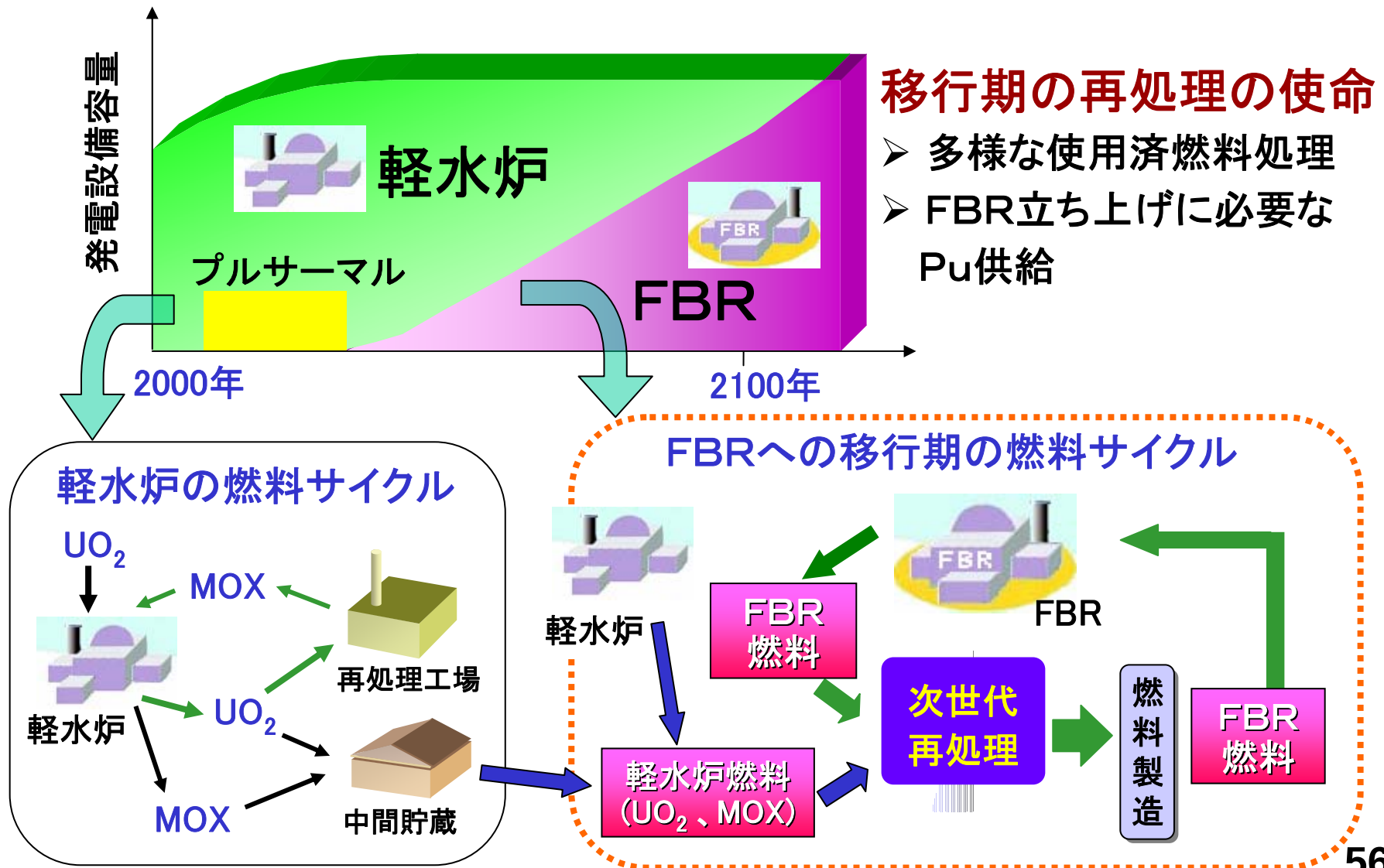
原子力立国計画(原子力部会報告書)より

5. 高速増殖炉サイクルの早期実用化

1. 高速増殖炉サイクル実用化に向けた移行シナリオの策定

- 原型炉「もんじゅ」の早期再開により、“信頼性の実証”と“ナトリウム取扱技術の確立”を実現する。
- 実証炉及び関連サイクル施設は2025年頃までの実現を目指す。
- 六ヶ所再処理工場の操業終了時(2045年頃)に、第二再処理工場を操業開始し、高速増殖炉用の燃料向けの再処理を行う。
- 商業炉を2050年より前に開発し、以後運転を終える既設の軽水炉は順次高速増殖炉にリプレース。

軽水炉サイクルから FBRサイクルへの移行



FBRサイクル時代の 再処理・リサイクル技術

- ・ 脱ピュレックス法 (Pu非単独分離、核拡散抵抗性)
- ・ MA回収機能必須
 - － 熱負荷低減による
 - ・ ガラス固化体発生量の低減
 - ・ 処分場への効率的処分
 - － 上記観点からは90%回収できればよい
- ・ 再処理工程と燃料製造工程の統合
- ・ 回収MAはFBRで燃焼

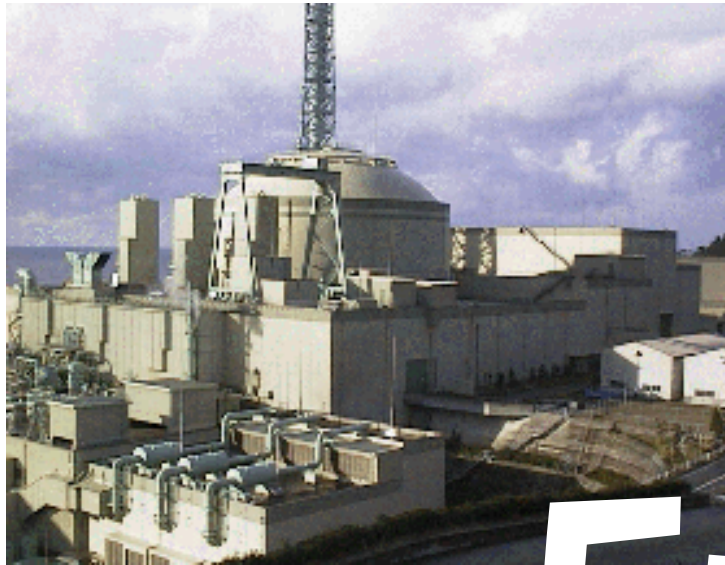
中村康治さん^(注)の遺言

- 核燃料サイクルは国民がその叡智と汗でエネルギーを産み出すシステムである！
- 在来化石燃料や燃料の使い捨て方式の核燃料利用では、結局天然資源の争奪の愚に至る！
- 長崎の体験をもつ日本民族であるがゆえに、両刃の剣であるプルトニウムを飼い馴らすことができ、そうする責任があろう！



「なぜ核燃料サイクルか？」 原子力工業 Vol. 36, No. 5 (1990)

(注)元動燃理事、日本の核燃料サイクル技術の先駆的指導者



End

