

核燃料サイクルの変遷

原子燃料工業(株) 大岡 靖典

蔵前工業会 関西5支部 「関西蔵前懇話会」
2013/11/14(木)

トピックス

- はじめに
- 核燃料の概要
- 核燃料の設計
- 核燃料の製造
- 核燃料サイクル
- サプライチェーン
- まとめ

トピックス

- はじめに
- 核燃料の概要
- 核燃料の設計
- 核燃料の製造
- 核燃料サイクル
- サプライチェーン
- まとめ



ペレット君(NFIマスコットキャラ)

自己紹介

- 2005年3月 理工学研究科 原子核工学専攻 博士課程修了
関本研究室(原子炉物理・新型炉概念)
博士論文「CANDLE燃焼法の高圧ガス炉への適用に関する研究」
- 2005年4月 原子燃料工業(株)入社(~7月 現場実習)
~現在 熊取事業所 技術開発部 核設計Gr配属
- 主な業務
 - 炉心設計・管理
 - 核設計コード開発
 - 新型燃料開発
 - 炉心特性測定手法開発
 - 燃料加工施設の耐震評価(設備管理部兼務業務)

原子燃料工業(株)の紹介

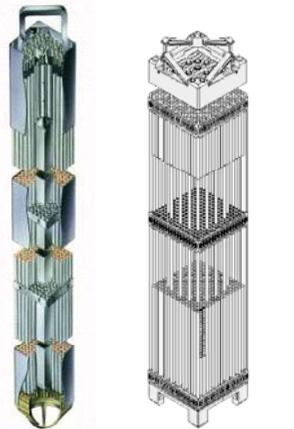
- 資本金:10億円
- 資本構成
 - Westinghouse EC 52%
 - 古河電気工業(株) 24%
 - 住友電気工業(株) 24%
- 設立:昭和47年7月8日
- 従業員:約800人
- 拠点
 - 本社:東京
 - 営業:東京,大阪
 - 支店:札幌,仙台,高松,福岡
 - 事業所:東海,熊取
 - 事務所:パリ
- HP: <http://www.nfi.co.jp>



事業内容

- 軽水炉(PWR/BWR)用原子燃料の開発・設計・製造
- 軽水炉(PWR/BWR)の炉心管理
- 高温ガス炉(HTR)、その他試験研究炉用燃料
- 原子燃料関連技術サービス(各種解析、技術援助等)
- 国内MOX燃料加工に関するエンジニアリング
- 燃料関連装置,原子炉及び周辺監視装置等の開発・設計・製造
- 電子線照射による滅菌・材料加工サービス

NFIで製造する原子燃料



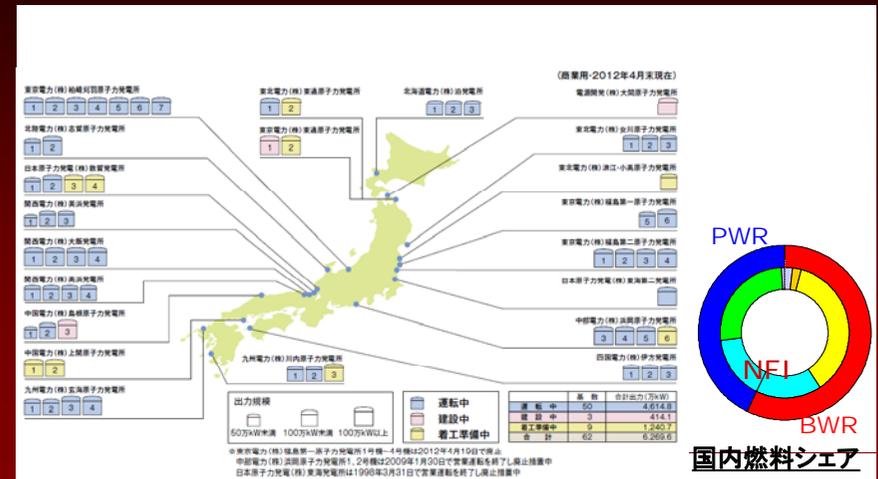
BWR燃料集合体 PWR燃料集合体

ATR燃料集合体

高温ガス炉燃料

FBR燃料部材

日本の原子力発電と燃料シェア

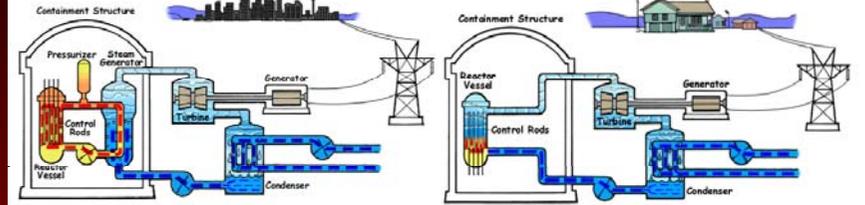


トピックス

- はじめに
- 核燃料の概要
- 核燃料の設計
- 核燃料の製造
- 核燃料サイクル
- サプライチェーン
- まとめ



軽水炉(PWR/BWR)の構造



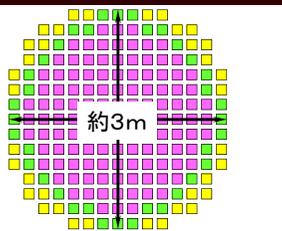
PWR(加圧水型軽水炉)
炉心圧力:約150気圧
炉心温度:約280~320℃

BWR(沸騰水型軽水炉)
炉心圧力:約75気圧
炉心温度:約220℃

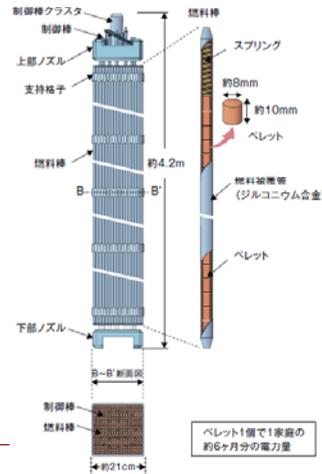
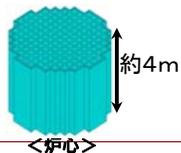
関西・九州・四国・北海道・日本原電の
5電力で採用
世界の商用原子炉の約70%

東京・東北・中部・中国・北陸・日本原電・
電源開発の7電力で採用
世界の商用原子炉の約20%

PWR燃料の概要

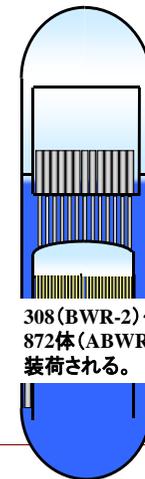


- 4ループ(193体, 17x17型)
- 3ループ(157体, 15x15/17x17型)
- 2ループ(121体, 14x14型)

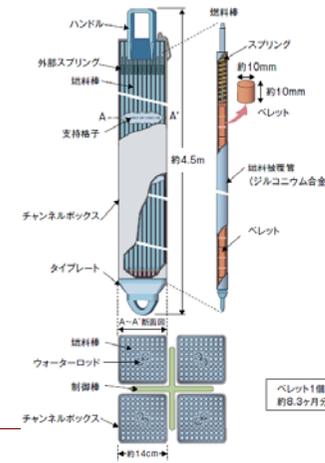


ペレット1個で1家庭の
約6ヶ月分の電力量

BWR燃料の概要



308(BWR-2)~
872体(ABWR)
装荷される。



ペレット1個で1家庭の
約6ヶ月分の電力量

軽水炉燃料の使用環境

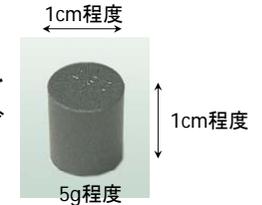
- 高圧; 約150気圧 (PWR)・約70気圧 (BWR)
- 高温; 約280~320°C (PWR)・約220°C (BWR)
- 放射線照射 (成長, 脆化)
- 耐機械的強度 (装荷時, 地震時)



通常運転状態でも過酷な環境,
健全性への要求は非常に高い

ペレット

- 発熱源
 - 高密度に焼結された二酸化重金属 (主にウラン)
 - 1個のペレットで一般家庭約半年分の発電源
- 「5重の壁」の第一壁
 - FPのマトリクス内への閉じ込め
- 経済的な燃料開発のキーとなる材料
 - 核分裂性核種を同体積に詰め込むほど長持ちする (高経済性) 燃料となる
 - しかし, 中性子・FPの発生量が増加し, 被覆管等部材への負担が増加するため, 燃料設計の重要なキーとなる



被覆管

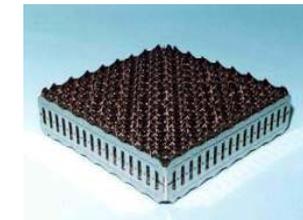
- 「5重の壁」の第二壁
 - ペレット, FP等の放射性物質の閉じ込め
 - 障壁の観点で最重要材料
- 軽水炉ではジルコニウム基合金を使用
 - 内側からはペレットの照射・熱膨張や FPガスの放出による圧力から延性が必要
 - 耐高温・高圧, 加工性に加え中性子吸収のしにくさからジルコニウムが選定
 - その他, 耐腐食性, 耐水素脆化性の観点から 数種の金属を混合して調整 (燃料メーカーのノウハウ)

スペーサ/グリッド

- 燃料棒束縛 & 冷却
 - 燃料棒の発熱を効率的に減速材に伝えることが 発電効率の向上に繋がる
 - 燃料棒保持力を保ったまま, 低圧力損失且つ高混合特性を達成する設計を行う



BWR用 スペーサ



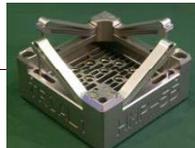
PWR用 グリッド

タイププレート/ノズル

- 上部: 位置の固定, 浮き上がり防止
- 下部: 位置の固定, 異物除去, 冷却



BWR用 タイプレート



PWR用 ノズル

トピックス

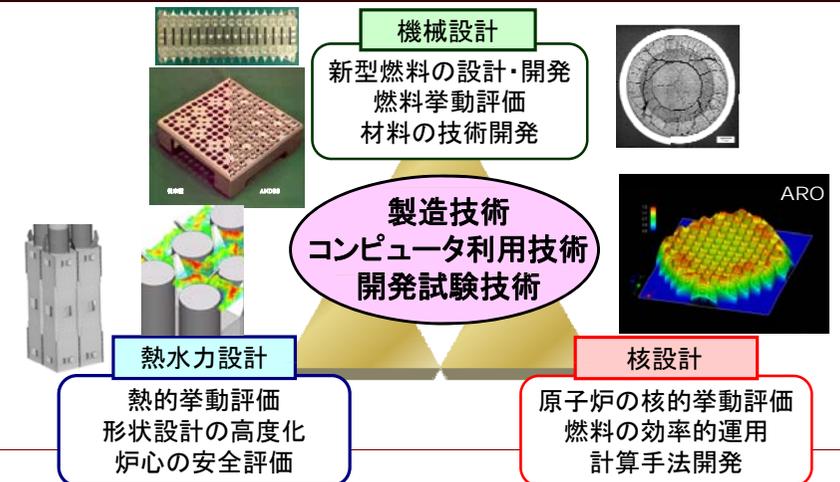
- はじめに
- 核燃料の概要
- 核燃料の設計
- 核燃料の製造
- 核燃料サイクル
- サプライチェーン
- まとめ



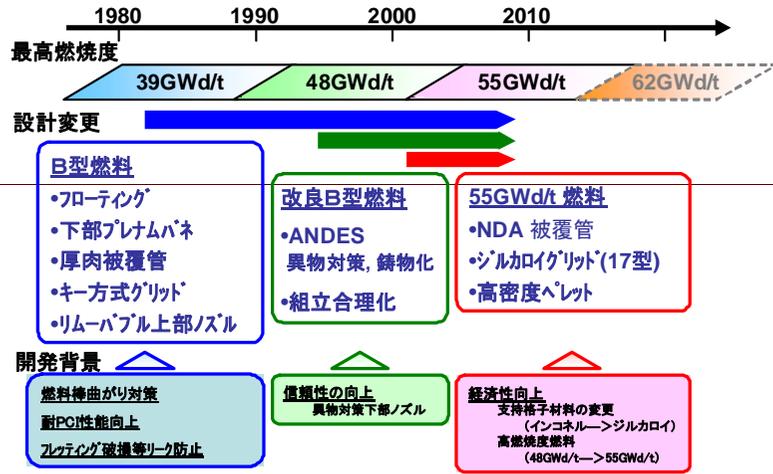
燃料に関する技術開発の観点

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> □ 経済性の追求 <ul style="list-style-type: none"> □ 燃料運用の高度化 <ul style="list-style-type: none"> □ 運転サイクル柔軟化 □ 出力変動 □ ウラン資源有効利用 <ul style="list-style-type: none"> □ 高燃焼度化 □ 燃料のリサイクル <ul style="list-style-type: none"> □ MOX燃料 □ 回収U燃料 | <ul style="list-style-type: none"> □ 健全性の確保 <ul style="list-style-type: none"> □ FP閉込機能の強化 <ul style="list-style-type: none"> □ 材料開発 □ 形状設計 □ 炉心の安全性確保 <ul style="list-style-type: none"> □ 燃料集合体設計 <ul style="list-style-type: none"> □ 燃料棒の配置 □ 炉心設計 <ul style="list-style-type: none"> □ 集合体の配置 |
|---|--|

核燃料の設計体系



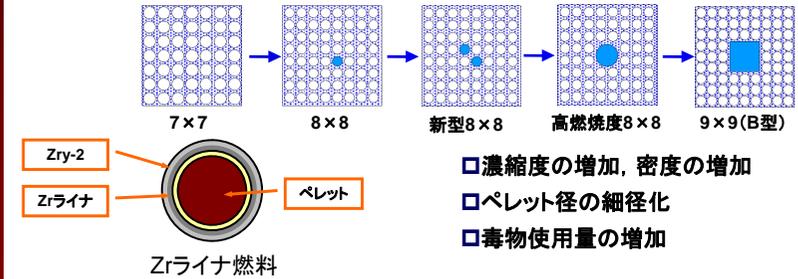
標準的なPWR燃料仕様の変遷



標準的なBWR燃料の変遷

年度	70	75	80	85	90	95	00
燃料形式	7×7燃料	7×7改良型燃料	8×8燃料	新型8×8燃料	新型9×8 Zrライナ燃料	高燃焼度8×8燃料	9×9燃料(B型)
平均燃焼度	~22GWd/t	~28GWd/t	~28GWd/t	~30GWd/t	~33GWd/t	~39GWd/t	~45GWd/t

現在の生産は全て9×9燃料



トピックス

- はじめに
- 核燃料の概要
- 核燃料の設計
- 核燃料の製造
- 核燃料サイクル
- サプライチェーン
- まとめ

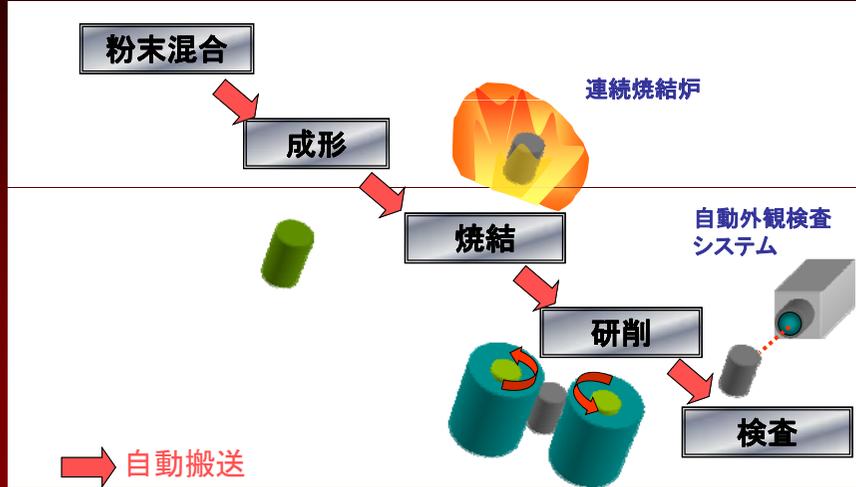


核燃料フロントエンド

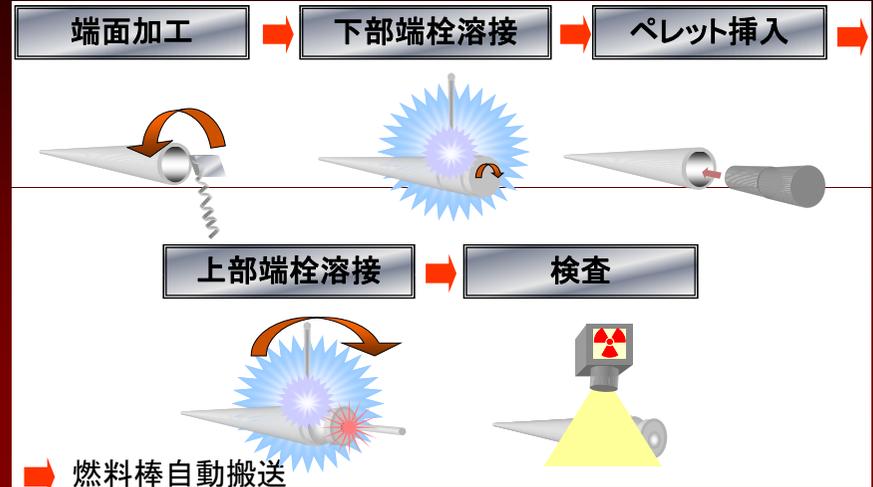
- ウラン採鉱・精錬
 - 鉱石からイエローケーキ(U_3O_8) 溶出工程
- 転換・濃縮・再転換
 - U-235存在比0.72%を4%程度まで濃縮する工程
 - イエローケーキから二酸化ウラン(固体)を経て, 六フッ化ウラン(気体)に転換し, ガス拡散や遠心分離にてU-235を濃縮
 - 六フッ化ウランを再び二酸化ウランに転換
- 成形加工
 - 燃料集合体に加工する工程(次頁~)



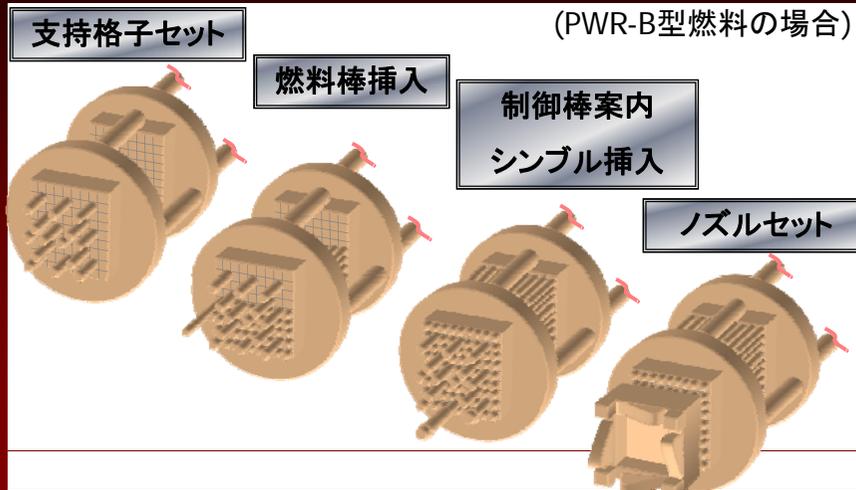
ペレット加工工程



燃料棒加工工程



燃料集合体組立工程

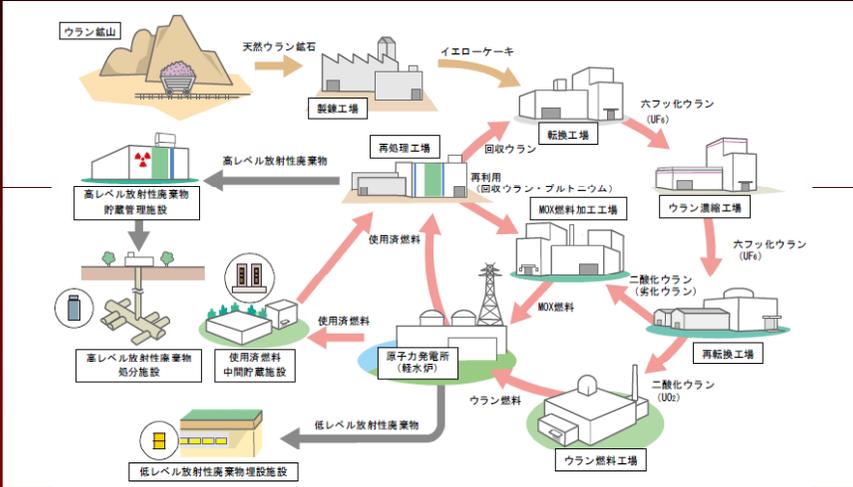


トピックス

- はじめに
- 核燃料の概要
- 核燃料の設計
- 核燃料の製造
- 核燃料サイクル
- サプライチェーン
- まとめ



核燃料サイクル概念図



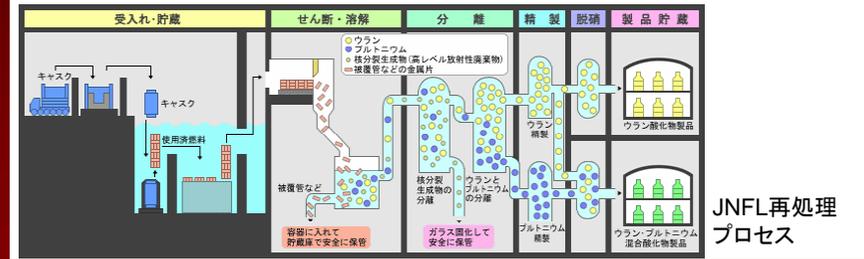
核燃料バックエンド(1)

再処理

使用済み燃料から核燃料として再利用するウラン、プルトニウムを抽出分離する工程

主にPUREX法が採用されている

燃料集合体を裁断・濃硝酸に溶解し、TBP溶液にて抽出分離



JNFL再処理プロセス

核燃料バックエンド(2)

再処理後

ウラン酸化物製品→回収ウラン燃料

フロントエンドの転換工程へ

ウラン・プルトニウム混合酸化物製品→MOX燃料

MOX燃料加工工程へ

廃棄物

高レベル放射性廃棄物→ガラス固化し冷却後地層処分

低レベル放射性廃棄物→減容処理後ドラム缶で保管・埋設

MOX燃料加工

ウラン燃料加工工程とプロセスは同様

放射線と発熱の遮蔽のため設備の高度化

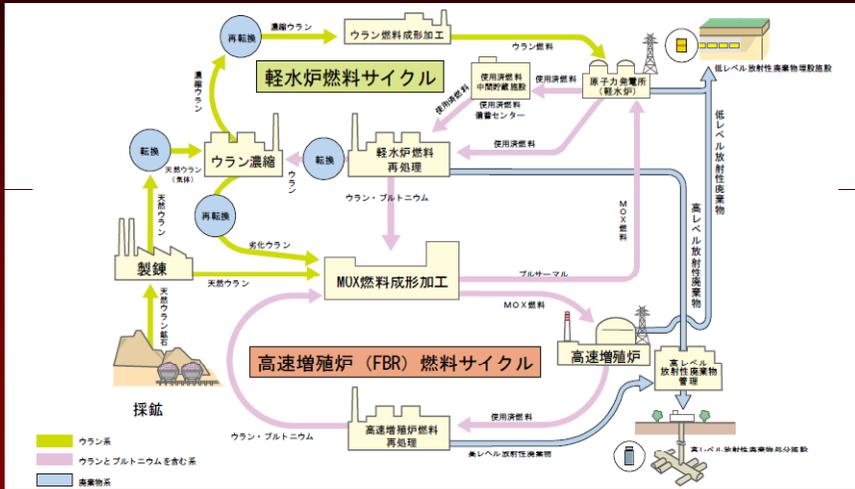
核防護・テロ対策のための監視・管理の高度化

粉末混合の高度化

(2012年12月現在)

国名	事業者	所在地	年間製造能力 (tHM/年)	操業開始年	製品
フランス	AREVA NC	マルクール	195	1995	LWR燃料
ベルギー	FBFC	デッセル	100	1997	PWR/BWR燃料
日本	独立行政法人日本原子力研究開発機構 (JAEA)	茨城県東海村	10	1988 (海軍専用)	FBR燃料
	日本原燃株式会社 (JNFL)	青森県六ヶ所村	130	2016 (LWR/BWR)	PWR/BWR燃料
ロシア	VI Lenin Research Institute of Nuclear Reactors (Niiar)	ディミトログラード	1	1975	FBR燃料
	Mayak Production Association	チェリャビンスク	0.5	1980	FBR燃料

高速炉サイクル

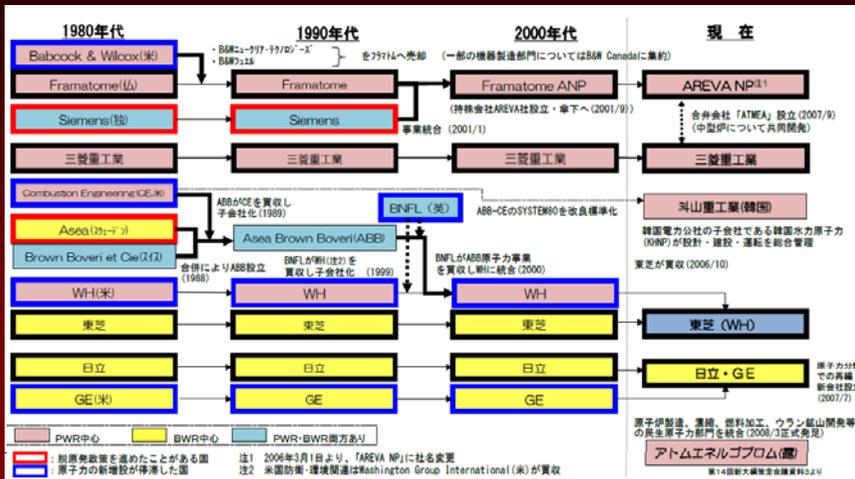


トピックス

- はじめに
- 核燃料の概要
- 核燃料の設計
- 核燃料の製造
- 核燃料サイクル
- サプライチェーン
- まとめ



プラントメーカーの寡占化



日本のウラン燃料加工工場

事業者名	技術提携	事業所名	炉型別	加工能力	(2004年3月現在)				
					事業許可年月	事業開始年月			
三菱原子燃料(株)	WH社	三菱原子燃料(株)	加圧水型	計440tU/年	100tU/年	1972.1	1972.1		
					280tU/年	1972.1	1973.1		
					420tU/年	1972.10	1973.6		
				440tU/年	1987.7	1988.5			
(株)グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン	GE社	(株)グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン	沸騰水型	140tU/年	140tU/年	1968.8	1970.8		
				計750tU/年(棒状)	210tU/年	1970.5	1971.12		
					490tU/年	1972.1	1974.9		
					640tU/年	1985.2	1985.4		
					750tU/年	1993.4	1994.10		
原子燃料工業(株)	フラマトム社	熊取事業所	研究炉	500tU/年	500tU/年	1972.9	1972.9		
				加工事業廃止	950tU/年	1972.12	1973.3		
		加工事業廃止	(注)	濃縮度90%以上	475kgU/年	475kgU/年	1975.8	1975.8	
					加工事業廃止	2001.2			
		加工事業廃止	(注)	濃縮度90%以上	加圧水型	40tU/年	40tU/年	1975.8	1976.2
						計284tU/年(棒状)	85tU/年	1978.9	1979.4
							265tU/年	1982.7	1984.1
							324tU/年	1992.11	1993.9
							284tU/年	1998.10	1999.9
							284tU/年	1998.10	1999.9
東海事業所	沸騰水型	計220tU/年(棒状)	40tU/年	40tU/年	1978.9	1980.1			
			100tU/年	100tU/年	1982.7	1983.5			
			200tU/年	200tU/年	1985.11	1986.9			
			250tU/年	250tU/年	2003.12				

(注)処理能力の表示の変更

日本のウラン燃料加工工場の変遷

- プラントメーカーの変遷(東芝のWH買収)に伴い株主構成・提携先などが大幅に変化
 - 三菱原子燃料(MHI・MMCの共同出資会社)
 - WHとの提携解消
 - 2009年4月AREVAが出資, 総合原子燃料会社として発足
 - GNf-J(GE・日立・東芝の共同出資会社)
 - 東芝との提携解消と日立・GEとの提携強化
 - 東芝は株主として継続
 - NFI(古河電工・住友電工の共同出資会社)
 - 2009年5月WHが出資し筆頭株主
 - AREVAとの提携は一部で継続
 - JNFL技術支援は従来通り継続

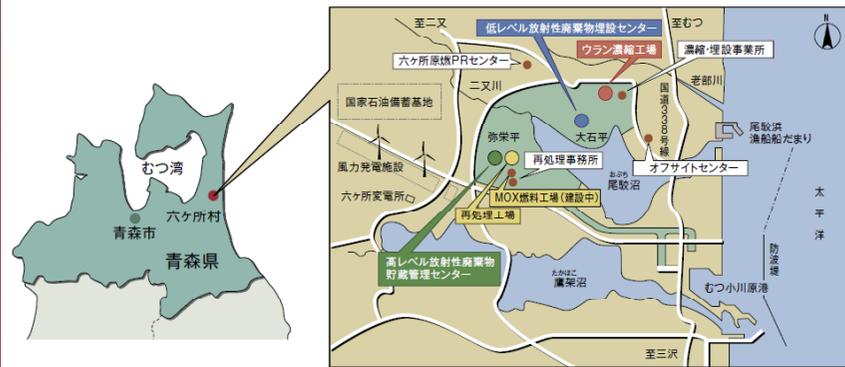
日本の核燃料サイクル施設

	再処理工場	高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センター	MOX燃料工場	ウラン濃縮工場	低レベル放射性廃棄物埋設センター
場 所	青森県六ヶ所村弥栄平地区			青森県六ヶ所村大石平地区	
規 模	最大処理能力 800 tU/年 使用済燃料貯蔵容量 3,000 tU	返還廃棄物貯蔵容量 ガラス固化体2,880本	最大加工能力 130 tHM ¹ /年 製品 国内軽水炉(BWR, PWR)用 MOX燃料集合体	最終的には 1,500 tSWU ² /年	最終的には約60万立方メートル (200tドラム缶約300万本相当)
現 状	建設中	累積受入 1,414本	建設中	新型离心机で 運転中	累積受入 1号廃棄物埋設施設 146,547本 2号廃棄物埋設施設 99,712本
工 期	工事開始 1993年 しゅん工 2013年(予定)	工事開始 1992年 操業開始 1995年	工事開始 2010年 しゅん工 2016年(予定)	工事開始 1998年 操業開始 1992年	工事開始 1990年 埋設開始 1992年

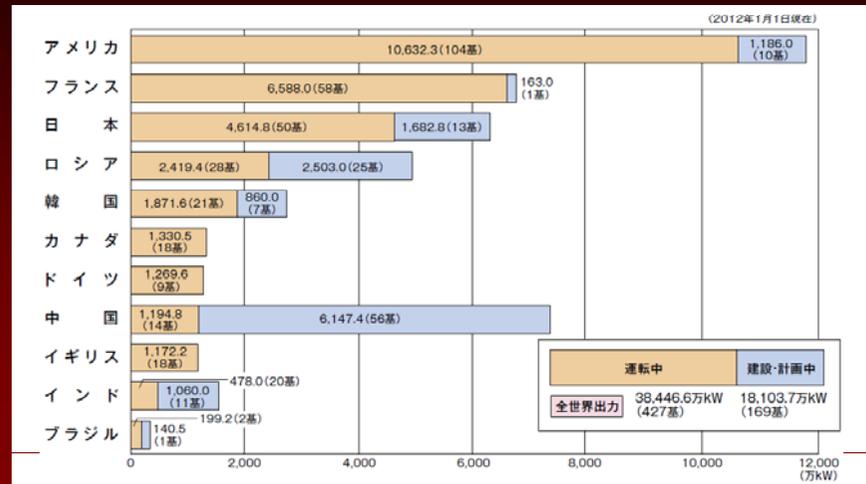
※1 HM-MOX中のプルトニウムとウランの金属成分の質量
 ※2 SWU:質量を表す単位。ウランの濃縮に必要な仕事量を表す単位
 ※3 低レベル放射性廃棄物20万立方メートル(200tドラム缶約100万本相当)分の建設費

日本の核燃料サイクル施設の立地

青森県六ヶ所村

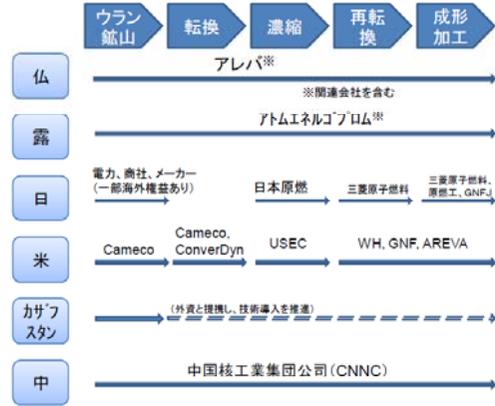


世界の原子力発電設備



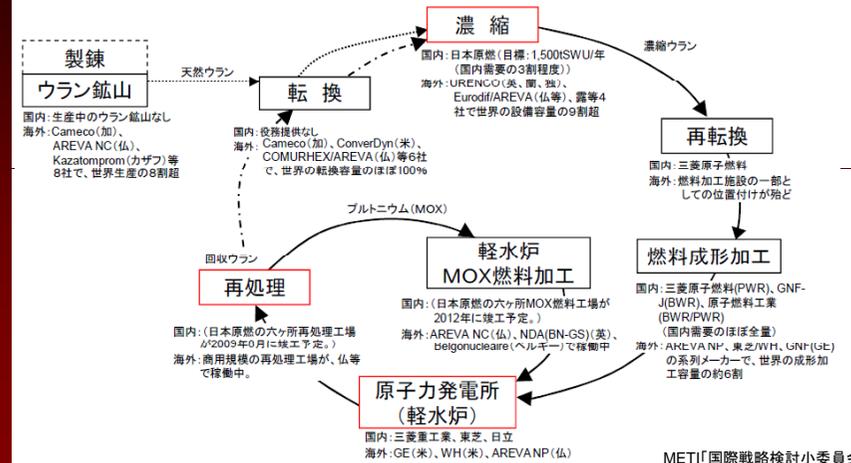
世界の燃料供給サプライチェーン

○フランスやロシアは、燃料供給のサプライチェーンをプラントビジネス展開上の強みとして活用。
○カザフスタンも、核燃料製造に関する技術導入を積極的に推進。



METI「国際戦略検討小委員会」

核燃料サイクル産業の現状



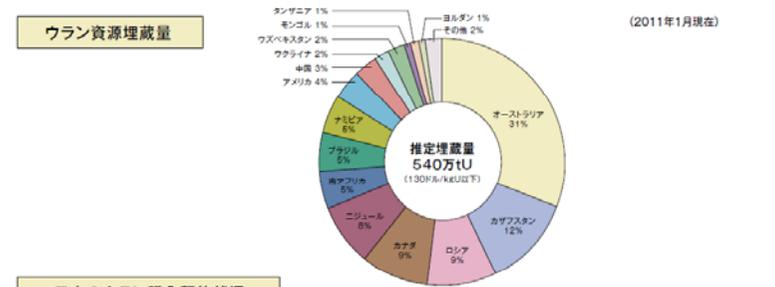
METI「国際戦略検討小委員会」

事業者別世界シェア

		2006年度市場規模	AREVA 仏	Cameco 加	URENCO 英・蘭・独	USEC 米	東芝-WH 日	BNFL-BNG 英	Rosatom 露	GE・日立 米・日	その他
フロントエンド	ウラン探鉱	65,000 t	20.25%	15.20%		6%			20.25%		25.30%
	転換	81,000 t	25.30%	20.25%		5.8%			20.25%		20.25%
	濃縮	4万3,000 tSWU	20.25%		20.25%	25.30%			20.25%		5.10%
	燃料加工	6,800 t	30.35%				20.25%		10.15%	15.20%	10.15%
原子伊・サービス		110 億ユーロ	20.25%				15.20%		5.10%	10.15%	35.40%
バックエンド	再処理	30,000 t	70.75%					10.15%	10.15%		
	MOX燃料	2,211 t	65.70%					1.5%			25.30%

出典:平成19年度核燃料サイクル技術等調査報告書(欧米における核燃料サイクルに関する調査)((独)日本原子力研究開発機構)

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 (2011年3月現在)

輸入契約形態	相手先国	契約数量 (U ₃₀₈ 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377,100
開発輸入分	ニジュール、カナダ、カザフスタン等	約81,600
合計		約458,700

ウラン転換工場の現状

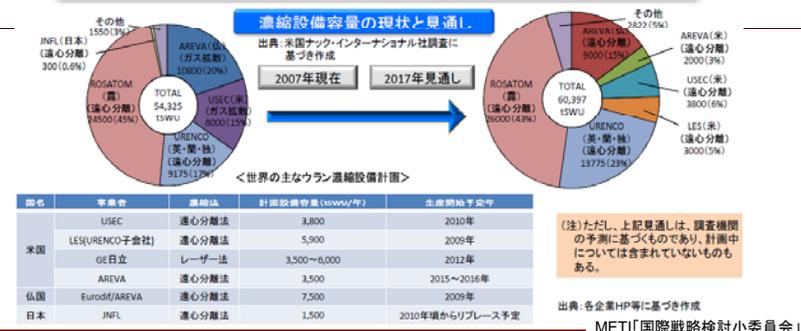
六フッ化ウラン(UF₆)の製造

(2012年12月現在)

国名	事業者	所在地	年間処理能力(tU [®] /年)
ロシア	Angarsk Electrolysis Chemical Combine (JSC AECC)	アンガルスク	20,000
	Urals Electrochemical Combine (JSC UECC)	エカチェリンブルグ	4,000
アメリカ	ConverDyn	メトロポリス	17,600
フランス	Comurhex (AREVA NC)	ピエールラット	14,000
カナダ	Cameco	ポートホープ	12,500
イギリス	Westinghouse	スプリングフィールズ	6,000
中国	中国核工業集团公司(CNEIC)	甘粛省蘭州	3,000
アルゼンチン	国立原子力委員会(CNEA)	ビルカニジェウ	62

ウラン濃縮産業の動向

- 世界のウラン濃縮は、Rosatom(露)、USEC(米)、AREVA(仏)、URENCO(英・蘭・独)だけで9割超が担われる寡占状態。各社とも2013年以降の濃縮ウラン2次供給の減少や将来需要をにらみ設備投資を計画。
- 技術については様々な評価があるが、今後、ロスアトムとURENCOの遠心分離法だけで世界の9割超を占めるとの見方もある。
- ロシアから米国向けの濃縮ウラン供給の減少は、我が国の米国からの安定調達にも影響する可能性。



ウラン濃縮工場の現状

(2012年12月現在)

国名	事業者	所在地	濃縮法	規模(tSWU [®] /年)
アメリカ	合衆国濃縮公社(USEC)	バデューカ	ガス拡散法	11,300
フランス	Eurodif	トリカスタン	ガス拡散法	10,800
イギリス	URENCO	カーペンハースト	遠心分離法	5,000
オランダ	URENCO	アルメロ	遠心分離法	4,600
ドイツ	URENCO	グローナウ	遠心分離法	3,250
ロシア	Shiberia Chemical & Complex (JSC SCC)	トムスク	遠心分離法	4,000
	Angarsk Electrolysis Chemical Combine (JSC AECC)	アンガルスク	遠心分離法	1,000
中国	中国核工業集团公司(CNNC)	陝西省漢中	遠心分離法	1,000
		甘粛省蘭州	遠心分離法	500
日本	日本原燃株式会社(JNFL)	青森県六ヶ所村	遠心分離法	最終的には1,500
パキスタン	パキスタン原子力委員会(PAEC)	カフタ	遠心分離法	5

ウラン再転換工場の現状

燃料集合体加工原料二酸化ウラン(UO₂)の製造

(2012年12月現在)

国名	事業者	所在地	年間処理能力(tU [®] /年)
カナダ	Cameco	ポートホープ	2,800
イギリス	Westinghouse	スプリングフィールズ	550
			65
日本	三菱原子燃料株式会社(MNF)	茨城県東海村	450
アルゼンチン	国立原子力委員会(CNEA)	コルドバ	175
インド	Nuclear Fuel Complex (NFC)	ハイデラバード	450

ウラン燃料加工工場の現状

(2012年12月現在)

国名	事業者	所在地	炉型	年間製造能力(tU ³ /年)
フランス	FBFC	ロマンス	PWR	1,400
アメリカ	GE Nuclear Energy	ウィルミントン	BWR	1,200
	Westinghouse	コロンビア	PWR	1,150
	AREVA NP	リッチランド	PWR,BWR	700
ロシア	Novosibirsk Chemical Concentrates Plant (JSC NCCP)	リンチバーグ	PWR	400
	Mashinostroitelny Zavod (JSC MSZ)	ノボシビルスク	WVER	1,200
日本	株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン (GNF-J)	エレクトロスターリ	WVER,PWR	950
	三菱原子燃料株式会社 (MNF)	神奈川県横浜須賀町	BWR	750
	原子燃料工業株式会社 (NFI)	茨城県東海村	PWR	440
		大阪府熊取町	PWR	284
ドイツ	Advanced Nuclear Fuels GmbH (ANF)	茨城県東海村	BWR	250
スウェーデン	Westinghouse	リンゲン	PWR,BWR	650
ベルギー	FBFC	ヴァストマンランド	PWR,BWR	600
韓国	Korea Nuclear Fuel Company Ltd. (KNFC)	テッセル	PWR,BWR	500
スペイン	ENUSA Industrias Avanzadas, S.A.	大田広城市	PWR	400
中国	Yibin Nuclear Fuel Element Plant	サラマンカ	PWR,BWR,WVER	400
イギリス	Westinghouse/UK	四川省宜賓	PWR	400
ブラジル	Industrias Nucleares do Brasil (INB)	スプリングフィールド	LWR,WVER	330
インド	Nuclear Fuel Complex (NFC)	リオアジャネイロ	PWR	240
		ハイデラバード	BWR	24

再処理工場

(2012年12月現在)

国名	事業者	所在地	工場名	年間処理能力(tU ³ /年)	操業開始年
フランス	AREVA NC	ラ・アーグ	UP2-800	1,000	1996
			UP3	1,000	1990
イギリス	Sellafield Ltd	セラフィールド	THORP	900	1994
			B205	1,500	1964
ロシア	Mayak Production Association	チェリャビンスク	RT-1	400	1971
日本	独立行政法人日本原子力研究開発機構 (JAEA)	茨城県東海村	東海研究開発センター 核燃料サイクル工学研究所	210	1981 (耐震補強中)
	日本原燃株式会社 (JNFL)	青森県六ヶ所村	再処理事業所	800	2013 (しゅん工予定)

トピックス

- はじめに
- 核燃料の概要
- 核燃料の設計
- 核燃料の製造
- 核燃料サイクル
- サプライチェーン
- まとめ



日本の原子力発電の現状

- 福島第一原子力発電所の事故処理作業が急務
 - 国内外の知見を用い対応中
- 国内商用炉は全機で停止中
 - 発電用軽水型原子炉の新安全基準に対し適合性審査を実施中(先行10炉心)
 - 適合コストが莫大な炉は廃炉を検討
- 燃料サイクル事業は概ね停止中
 - 新安全基準対応を実施中(12月施行)
 - 生産量の大幅な低下に伴いコスト削減実施

世界の原子力発電の現状

- 米国では2007年頃にはリプレースに伴う原子力カルネッサンスが賑わったが、シェールガス革命の影響でトーンダウン、経済性の悪い原子炉は順次閉鎖
- 中国・韓国・ロシア・インドは国策として着実に拡大中
- 英国で新設(リプレース)計画
- 中東・東南アジアを中心に多数の導入計画
 - トルコ・UAE・ベトナム・インドネシア・イラン・イスラエルなど

今後の日本の原子力事業者は？

- 国内事業の発展
 - 福島廃炉作業は第一優先課題
 - 新基準対応と再稼働・安定運転(貿易赤字の回復・早期復興)
 - 事故耐性強化燃料・サイクルの研究開発
 - 核燃料サイクルの構築
 - 海外事業展開
 - 海外プラント建設受注(海外メーカーとの提携強化)
 - 原子力途上国の人材育成・規制整備・技術支援
- ➡ 優秀な人材の継続的な確保・育成が重要

御静聴ありがとうございました。